

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра управления в технических системах**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.И. Луковникова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

**Б1.Б.12**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Многоканальные телекоммуникационные системы**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>	<b>4</b>
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	5
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	8
4.3 Лабораторные работы.....	84
4.4 Практические занятия.....	84
4.5 Контрольные мероприятия: курсовая работа, контрольная работа.....	85
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>87</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>88</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>88</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>88</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>89</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ .....	89
9.2. Методические указания по выполнению курсовой работы, контрольной работы	146
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>147</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>147</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>149</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>158</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>159</b>
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>	<b>160</b>

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к проектному виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Изучение теории различных электрических цепей и ее прикладного применения для решения проблем передачи, обработки и распределения электрических сигналов управления и связи. Дисциплина должна обеспечивать формирование фундамента подготовки будущих специалистов в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.

## Задачи дисциплины

Задачами изучения теории электрических цепей является обеспечение целостного представления студентов о проявлении электромагнитного поля в электрических цепях, составляющих основу различных устройств инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-4	способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов в области теории электрических цепей.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ по исследованию электрических цепей.</li> </ul>
ПК-7	готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основы теории, методы и средства теоретического и экспериментального исследования линейных и нелинейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях; основы теории четырехполюсников и цепей с распределенными параметрами, устойчивости электрических цепей с обратной связью, электрических аналоговых, дискретных и цифровых фильтров.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- рассчитывать и измерять параметры и характеристики линейных и нелинейных электрических цепей, рассчитывать и анализировать параметры электрических цепей и фильтров на персональных компьютерах.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками экспериментального</li> </ul>

		исследования электрических цепей в рамках физического и математического моделирования.
ПК-16	готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыки сбора научно-технической информации в отечественных и зарубежных источниках.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области исследования электрических цепей.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками обработки собранной научно-технической информации в области исследования электрических цепей.</li> </ul>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.12 Теория электрических цепей относится к базовой части.

Дисциплина теория электрических цепей базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин Б1.Б.6 Математический анализ, Б1.Б.9 Физика, Б1.В.7 Физические основы электроники.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, теория электрических цепей представляет основу для изучения дисциплин: Б1.Б.14 Общая теория связи, Б1.Б.15 Схемотехника телекоммуникационных систем, Б1.Б.17 Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей, Б1.Б.22 Цифровая обработка сигналов.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа, контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2	3,4	252	158	70	35	53	67	КР, кр	Экзамен, зачет
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час	
			3	4
1	2	3	4	5
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	158	35	68	90
Лекции (Лк)	70	-	34	36
Лабораторные работы (ЛР)	35	35	17	18
Практические работы (ПР)	53	-	17	36
Курсовая работа (КР)	+	-	-	+
Контрольная работа (кр)	+	-	+	-
Индивидуальные(групповые) консультации	+	-	+	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	67	-	4	63
Подготовка к лабораторным работам	10	-	-	10
Подготовка к практическим работам	6	-	-	6
Подготовка к зачету	2	-	2	-
Подготовка к экзамену в течение семестра	27	-	-	27
Выполнение курсовой работы	20	-	-	20
Выполнение контрольной работы	2	-	2	-
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен зачет</b>	27	-	-	27
	+	-	+	-
Общая трудоемкость дисциплины ..... час.	252	-	72	180
зач. ед.	7	-	2	5

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические работы	
1	2	3	4	5	6	7
<b>1.</b>	<b>Основные законы и общие методы анализа цепей</b>	<b>36</b>	<b>15</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>2</b>
1.1.	Элементы цепей.	3	1	2	-	-
1.2.	Закон Ома.	2	1	-	1	-
1.3.	Законы Кирхгофа.	3	1	-	2	-
1.4.	Резистивные цепи.	3	2	-	1	-

1.5.	Баланс мощностей.	3	1	-	2	-
1.6.	Двухполюсники.	5	2	2	1	-
1.7.	Метод эквивалентного генератора.	4	2	-	2	-
1.8.	Метод наложения.	3	1	1	1	
1.9.	Метод узловых потенциалов.	5	2	1	1	1
1.10.	Метод контурных токов.	5	2	1	1	1
<b>2.</b>	<b>Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей</b>	<b>42</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>2</b>
2.1.	Гармоническое колебание.	4	2	-	2	-
2.2.	Комплексные величины.	2	2	-	-	-
2.3.	Символическая схема.	1	1	-	-	-
2.4.	Символический метод расчета цепей.	6	2	2	2	-
2.5.	Баланс мощностей.	5	2	2	1	-
2.6.	Комплексная передаточная функция.	5	2	-	2	1
2.7.	Частотные характеристики цепей.	11	4	2	4	1
2.8.	Колебательные контуры и их параметры.	8	4	4	-	-
<b>3.</b>	<b>Режим негармонических воздействий</b>	<b>44</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>16</b>
3.1.	Классический метод анализа.	20	4	6	4	6
3.2.	Временной метод анализа.	10	4	-	2	4
3.3.	Операторный метод анализа.	14	4	-	4	6
<b>4.</b>	<b>Цепи с распределенными параметрами</b>	<b>30</b>	<b>7</b>	<b>-</b>	<b>4</b>	<b>19</b>
4.1.	Длинные линии.	7	1	-	-	6
4.2.	Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.	9	2	-	1	6
4.3.	Падающая и отраженная волны в линии.	4	1	-	1	2
4.4.	Уравнение передачи длинной линии.	4	1	-	1	2
4.5.	Линия без потерь.	4	1	-	1	2
4.6.	Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.	2	1	-	-	1
<b>5.</b>	<b>Четырехполюсники</b>	<b>34</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>14</b>
5.1.	Уравнения передачи четырехполюсников.	4	1	-	1	2
5.2.	Параметры четырехполюсников.	9	2	4	1	2
5.3.	Схемы замещения четырехполюсников.	5	1	2	-	2
5.4.	Характеристические параметры четырехполюсника.	6	1	2	1	2
5.5.	Рабочие параметры четырехполюсников.	3	1	-	-	2
5.6.	Регулярные однонаправленные	7	2	-	1	4

	соединения четырёхполюсников.					
<b>6.</b>	<b>Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи</b>	<b>18</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
6.1.	Цепи с обратной связью.	5	1	-	2	2
6.2.	Устойчивость линейных цепей с обратной связью.	8	2	-	2	2
6.3.	Автоколебательные цепи.	3	1	-	2	2
6.4.	Различные схемы автогенераторов.	2	1	-	-	1
<b>7.</b>	<b>Электрические фильтры</b>	<b>21</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
7.1.	Основные понятия и определения	7	1	2	2	2
7.2.	Нормированные частоты и сопротивления.	7	1	2	2	2
7.3.	Преобразование шкалы частот.	5	1	-	2	2
7.4.	Основы синтеза ФНЧ-прототипа.	2	1	-	-	1
	<b>ИТОГО</b>	<b>225</b>	<b>70</b>	<b>35</b>	<b>53</b>	<b>67</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Основные законы и общие методы анализа цепей

#### Тема 1.1. Элементы цепей

Активные линейные элементы — источники электромагнитной энергии. Идеальный независимый источник напряжения (рис. 1.1,а) характеризуется задающим напряжением и или электродвижущей силой (ЭДС)  $e$ . Напряжение на зажимах идеального источника напряжения (ЭДС) не зависит от величины протекающего через него тока.

Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения (ЭДС) равно нулю. Зависимость напряжения на зажимах элемента цепи от тока, протекающего через него, носит название вольт-амперной характеристики (ВАХ) данного элемента. ВАХ идеального источника напряжения (ЭДС) представляет собой прямую, параллельную оси тока (рис. 1.2,а).

Реальный источник напряжения (ЭДС) (рис. 1.1,б) с конечным внутренним сопротивлением может быть изображен в виде последовательно соединенных идеального источника напряжения и внутреннего сопротивления  $R$ .

Идеальный независимый источник тока (рис. 1.2,в) характеризуется своим задающим током  $J$ , величина которого не зависит от напряжения на зажимах источника. Внутренняя проводимость идеального источника тока равна нулю. ВАХ представляет собой прямую, параллельную оси напряжения (рис. 1.2,б).

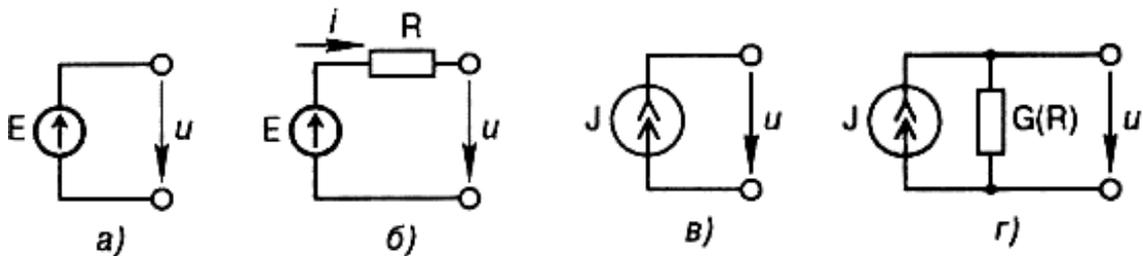


Рис. 1.1

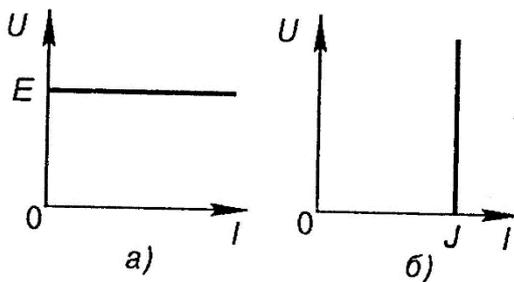


Рис. 1.2

Реальный источник тока (рис. 1.1,г) с конечной внутренней проводимостью  $G = 1/R$  может быть изображен в виде идеального источника тока и внутренней проводимости  $G$ , которые соединены параллельно.

Напряжение на зажимах реальных источников и отдаваемый ими во внешнюю цепь ток зависят от параметров цепи. ВАХ реальных источников напряжения или тока имеет угол наклона, тангенс которого пропорционален внутреннему сопротивлению  $R$  или проводимости  $G$  соответственно.

Переход от схемы источника напряжения к эквивалентной схеме источника тока осуществляется по формулам

$$J = E/R, \quad E = J/G, \quad R = 1/G. \quad (1.1)$$

Пассивные линейные элементы. Резистивное сопротивление ( $R$ ) — идеализированный элемент, обладающий свойством необратимого рассеивания энергии.

Ток и напряжение на резистивном сопротивлении определяются законом Ома

$$u = Ri; \quad i = Gu \quad (1.2)$$

где  $R$  — сопротивление;  $G$  — электрическая проводимость,  $G = 1/R$ .

Индуктивный элемент, или индуктивность ( $L$ ) — идеализированный элемент, обладающий свойством накапливать и отдавать энергию магнитного поля. Ток и напряжение на индуктивности связаны следующими соотношениями:

$$u = L \frac{di}{dt}; \quad i = \frac{1}{L} \int u dt \quad (1.3)$$

Емкостной элемент, или емкость ( $C$ ) — идеализированный элемент, обладающий свойством накапливать и отдавать энергию электрического поля. Ток и напряжение на емкости связаны следующими соотношениями:

$$i = C \frac{du}{dt}; \quad u = \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.4)$$

### Тема 1.2. Закон Ома

Закон Ома применяется для отдельной ветви или для одноконтурной замкнутой цепи (не имеющей разветвлений). При расчете тока по закону Ома прежде всего необходимо произвольно задать положительное направление тока.

Для ветви между узлами  $a$ ,  $b$  при положительном направлении тока от узла  $a$  к узлу  $b$

$$I = \frac{V_a - V_b + \sum E}{\sum R} = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R} \quad (1.5)$$

где  $V_a$  и  $V_b$  — потенциалы узлов  $a$  и  $b$ ;  $U_{ab} = V_a - V_b$  — разность потенциалов или напряжение между узлами  $a$  и  $b$ ;  $\sum E$  — алгебраическая сумма ЭДС, находящихся в этой ветви (ЭДС, совпадающая по направлению с током, учитывается со знаком плюс, направленная встречно — со знаком минус);  $\sum R$  — арифметическая сумма сопротивлений ветви (полное сопротивление ветви между узлами  $a$  и  $b$ ).

Формулу (1.5) называют обобщенным законом Ома.

Для замкнутой одноконтурной цепи

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} \quad (1.6)$$

где  $\sum R$  — арифметическая сумма всех сопротивлений цепи;  $\sum E$  — алгебраическая сумма электродвижущих сил в цепи.

Со знаком плюс учитываются те ЭДС, направления которых совпадают с выбранным положительным направлением тока, а со знаком минус — ЭДС с противоположными направлениями.

### Тема 1.3. Законы Кирхгофа

В основе методов анализа электрических цепей лежат законы Кирхгофа.

Первый закон — закон токов Кирхгофа (ЗТК) формулируется по отношению к узлам электрической цепи и гласит: алгебраическая сумма токов ветвей, *сходящихся в любом узле электрической цепи,*

равна нулю. Он отражает тот факт, что в узлах не могут накапливаться заряды. Формально первый закон Кирхгофа записывается так:

$$\sum_{k=1}^m i_k = 0 \quad (1.10)$$

где  $m$  — число ветвей, сходящихся в узле.

В уравнении (1.10) токи, одинаково ориентированные относительно узла, имеют одинаковые знаки, т.е. токи, направленные к узлу, берутся с одним знаком (например, плюс), а токи, направленные от узла, берутся с противоположным знаком (для нашего примера — минус). Можно, наоборот, знаки выходящих из узла токов считать положительными, а входящих в узел — отрицательными.

Закон токов справедлив и по отношению к сечениям электрической цепи.

Второй закон — закон напряжений Кирхгофа (ЗНК) формулируется по отношению к контурам. Контуром называется любой замкнутый путь в цепи. Второй закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма напряжений ветвей в любом контуре цепи равна нулю*:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1.11)$$

где  $n$  — число ветвей, входящих в контур. Ветвью называется часть цепи, включенная между двумя узлами.

В уравнении (1.11) напряжения, совпадающие с направлением обхода контура, записываются со знаком плюс, а противоположные направлению обхода — со знаком минус.

Если контур содержит ЭДС, то второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: *алгебраическая сумма падений напряжений в любом контуре цепи равна алгебраической сумме ЭДС в данном контуре*:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^n E_k \quad (1.12)$$

Направление обхода контура выбирается произвольно. При записи левой части равенства со знаком плюс берутся падения напряжения в тех ветвях, в которых выбранное положительное направление тока совпадает с направлением обхода (независимо от направления ЭДС в этих ветвях), а со знаком минус — падения напряжения в тех ветвях, в которых положительное направление тока противоположно направлению обхода. При записи правой части равенства ЭДС, направления которых совпадают с выбранным направлением обхода (независимо от направления тока, протекающего через них), берутся со знаком плюс, а ЭДС, направленные против выбранного направления обхода, — со знаком минус.

**Применение законов Кирхгофа.** Метод расчета электрических цепей, основанный на законах Кирхгофа, в которых независимыми переменными являются токи ветвей, называют методом токов ветвей. В этом случае устанавливается число неизвестных токов, равное числу ветвей, не содержащих источников тока. Для каждой такой ветви задается произвольно положительное направление тока.

Число независимых уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, будет на единицу меньше числа узлов электрической цепи. При этом под узлом подразумевается место (точка) соединения трех и более элементов цепи.

Число независимых уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа,

$$K = N_B - N_y + 1 - N_T, \quad (1.13)$$

где  $N_B$  — число ветвей цепи;  $N_y$  — число узлов цепи;  $N_T$  — число ветвей цепи, содержащих источники тока.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует выбирать независимые контуры, не содержащие источников тока. Независимым называется контур, который содержит хотя бы одну ветвь, не входящую в другие контуры цепи.

Общее число уравнений, составляемых по первому и второму законам Кирхгофа, равно числу ( $N_B - N_T$ ) неизвестных токов.

#### Тема 1.4. Резистивные цепи

К резистивным цепям относятся электрические цепи, содержащие в качестве пассивных элементов только резистивные сопротивления.

Если электрическая цепь содержит один источник энергии, то для упрощения расчетов данной цепи целесообразно использовать преобразования электрических схем. В основе различных методов преобразования электрических схем лежит *принцип эквивалентности*, согласно которому напряжения и токи в ветвях схемы, не затронутых преобразованием, остаются неизменными.

Рассмотрим наиболее часто используемые преобразования, основанные на принципе эквивалентности.

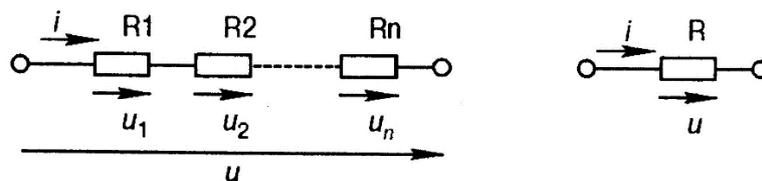


Рис. 1.9

**Последовательное соединение элементов.** Согласно первому закону Кирхгофа при последовательном соединении элементов через них протекает один и тот же ток (рис. 2.9). При этом по второму закону Кирхгофа напряжение, приложенное ко всей цепи, равно сумме напряжений на каждом из элементов:

$$u = \sum_{k=1}^n u_k. \quad (1.14)$$

Тогда для последовательного соединения резистивных сопротивлений  $R_1, R_2, \dots, R_n$  с учетом  $u = Ri$  будем иметь

$$u = i \sum_{k=1}^n R_k = iR, \quad (1.15)$$

где

$$R = \sum_{k=1}^n R_k.$$

Таким образом, цепь из  $n$  последовательно соединенных резистивных элементов может быть заменена одним эквивалентным резистивным элементом, эквивалентное сопротивление которого равно сумме сопротивлений отдельных резистивных элементов.

При последовательном соединении  $n$  сопротивлений напряжения на них распределяются прямо пропорционально этим сопротивлениям:

$$u_1 : u_2 : \dots : u_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n. \quad (1.16)$$

В частном случае двух последовательно соединенных сопротивлений:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad u_1 = \frac{uR_1}{R_1 + R_2}; \quad u_2 = \frac{uR_2}{R_1 + R_2}, \quad (1.17)$$

где  $u$  — общее напряжение, действующее на участке цепи, содержащем два сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , соединенных последовательно.

**Параллельное соединение элементов.** При параллельном соединении элементов согласно второму закону Кирхгофа к ним будет приложено одно и то же напряжение (рис. 1.10). При этом по первому закону Кирхгофа ток на входе всей цепи равен сумме токов в каждом из элементов:

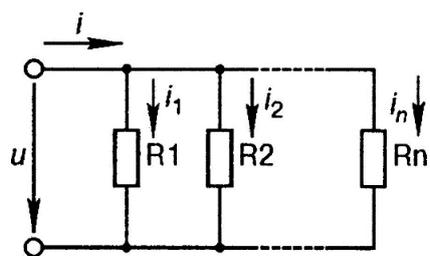
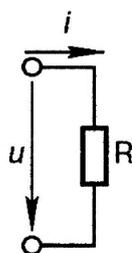


Рис. 1.10



$$i = \sum_{k=1}^n i_k. \quad (1.18)$$

На основании этого уравнения с учетом формулы  $i = Gu$  получаем для параллельного соединения резистивных элементов

$$i = u \sum_{k=1}^n G_k = uG, \quad (1.19)$$

где

$$G = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1.20)$$

Следовательно, цепь из  $n$  параллельно соединенных резистивных элементов можно заменить одним эквивалентным резистивным элементом, эквивалентная проводимость которого равно сумме проводимостей отдельных резистивных элементов. Таким образом, можно записать

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1.21)$$

В частности, при  $n = 2$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.22)$$

При параллельном соединении  $n$  сопротивлений токи в ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям или прямо пропорционально их проводимостям:

$$i_1 : i_2 : \dots : i_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n} = G_1 : G_2 : \dots : G_n. \quad (1.23)$$

Ток  $i_n$  в каждой из ветвей вычисляется через ток  $i$  в неразветвленной части цепи:

$$i_n = i \frac{G_n}{\sum_{k=1}^n G_k}. \quad (1.24)$$

В частном случае двух параллельных ветвей:

$$i_1 = i \frac{G_1}{G_1 + G_2}; \quad i_2 = i \frac{G_2}{G_1 + G_2} \quad (1.25)$$

или

$$i_1 = i \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad i_2 = i \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

### Тема 1.5. Баланс мощностей

Баланс мощностей вытекает из теоремы Теллегена.

Пусть граф некоторой электрической цепи содержит  $n_B$  ветвей и  $n_U$  узлов. Для согласованных направлений напряжений и токов ветвей по теореме Теллегена сумма попарных произведений напряжений и токов  $i_k$  всех ветвей ориентированного графа, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^{n_B} u_k i_k = 0. \quad (1.26)$$

Произведение  $u_k i_k$  представляет собой мгновенную мощность  $p_k$   $k$ -й ветви графа, поэтому в соответствии с (1.26) алгебраическая сумма мгновенных мощностей всех ветвей цепи равняется нулю. Если в (1.26) выделить участки цепи с независимыми источниками, то баланс мощности можно сформулировать следующим образом: алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равняется алгебраической сумме мощностей, потребляемых остальными участками электрической цепи.

Мощность источника постоянного напряжения

$$P_u = EI = UI,$$

где  $E$  и  $U$  — ЭДС или задающее напряжение источника соответственно;  $I$  — ток, протекающий в ветви с источником. Если ЭДС и ток совпадают по направлению (рис. 1.15,а), то их произведение

берется со знаком плюс, если их направления противоположны, то со знаком минус. Соответственно для  $U$  наоборот.

Мощность источника постоянного тока

$$P_j = JU,$$

где  $J$  — ток источника,  $U$  — напряжение на зажимах источника. Если напряжение и ток источника направлены противоположно (рис. 1.15,б), то их произведение берется со знаком плюс, если они совпадают по направлению, то со знаком минус.

Мощность в резистивном сопротивлении может быть записана как

$$P = UI,$$

где  $U$  — напряжение на резистивном сопротивлении;  $I$  — ток, протекающий в ветви с  $R$ . Если напряжение и ток совпадают по направлению, то их произведение берется со знаком плюс, если их направления противоположны, то со знаком минус.

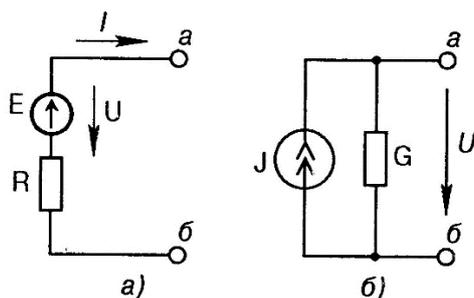


Рис. 1.15

С учетом закона Ома легко получить следующие формулы расчета мощности:

$$P = RI^2, \text{ или } P = GU^2,$$

где направление тока или напряжения не имеет значения.

В качестве примера запишем баланс мощностей для цепи, приведенной на рис. 1.16:

$$EI = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I^2 R_i.$$

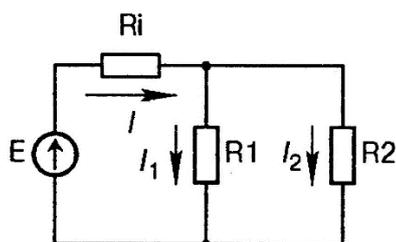


Рис. 1.16

## Тема 1.6. Двухполюсники

Двухполюсником называется электрическая цепь, имеющая два зажима (вывода, полюса) для подключения к внешней цепи.

Двухполюсник называется активным, если он содержит хотя бы один источник электрической энергии и напряжение холостого хода на его зажимах не равно нулю, и пассивным в противном случае.

Двухполюсники, обладающие одинаковыми входными характеристиками, называются эквивалентными.

Рассмотрим наиболее типичные преобразования двухполюсников, основанные на принципе эквивалентности.

Последовательное и параллельное соединения резистивных элементов были рассмотрены в разд. 1.1.4. Основываясь на изложенных там характеристиках данных соединений, получим основные формулы эквивалентных преобразований для других элементов электрической цепи.

Для последовательного соединения индуктивных элементов  $L_1, L_2, \dots, L_n$  с учетом  $u = L \frac{di}{dt}$  получаем (рис. 1.17)

$$u = \sum_{k=1}^n L_k \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}, \quad (1.27)$$

где

$$L = \sum_{k=1}^n L_k.$$

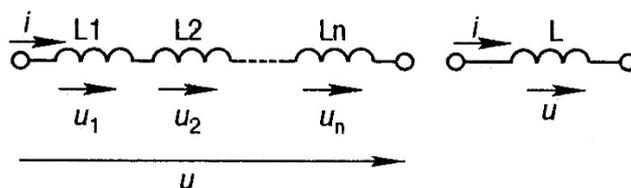


Рис. 1.17

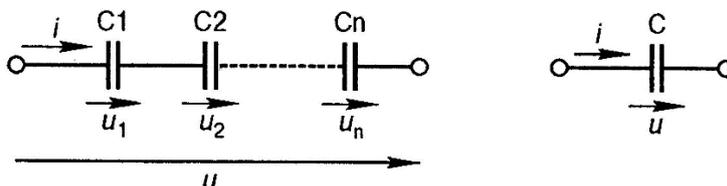


Рис. 1.18

Для последовательного соединения емкостных элементов  $C_1, C_2, \dots, C_n$  с учетом  $u_C = \frac{1}{C} \int i dt$  находим (рис. 1.18)

$$u = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \int i dt = \frac{1}{C} \int i dt, \quad (1.28)$$

где

$$\frac{1}{C} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}.$$

Таким образом, цепь из  $n$  последовательно соединенных индуктивных или емкостных элементов может быть заменена одним эквивалентным индуктивным или емкостным элементом с параметрами, определяемыми формулами (1.27), (1.28). Причем при нахождении эквивалентной индуктивности необходимо суммировать индуктивности отдельных индуктивных элементов, а для нахождения эквивалентной обратной емкости — суммировать величины, обратные емкостям отдельных емкостных элементов.

В частности, при  $n = 2$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

При последовательном соединении независимых источников напряжения они заменяются одним эквивалентным источником напряжения с ЭДС  $e$  или задающим напряжением  $u_r$ , равным алгебраической сумме ЭДС или задающих напряжений отдельных источников соответственно.

Причем со знаком плюс берутся ЭДС или задающие напряжения, совпадающие с ЭДС или задающим напряжением эквивалентного источника, а со знаком минус — несовпадающие (рис. 1.19).

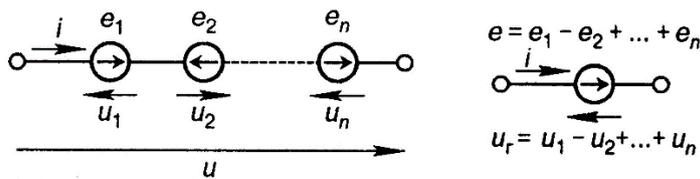


Рис. 1.19

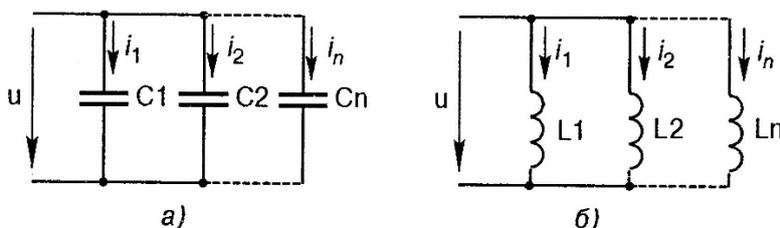


Рис. 1.20

Для параллельного соединения емкостных элементов с учетом  $i = C \frac{du}{dt}$  получаем (рис. 1.20,а)

$$i = \sum_{k=1}^n C_k \frac{du}{dt} = C \frac{du}{dt}, \quad (1.29)$$

где

$$C = \sum_{k=1}^n C_k.$$

Для параллельного соединения индуктивных элементов с учетом  $i = \frac{1}{L} \int u dt$  получаем (рис. 1.20,б)

$$i = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \int u dt = \frac{1}{L} \int u dt, \quad (1.30)$$

где

$$\frac{1}{L} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k}.$$

Следовательно, цепь из  $n$  параллельно соединенных индуктивных или емкостных элементов можно заменить одним эквивалентным индуктивным или емкостным элементом с параметрами, определяемыми формулами (1.29), (1.30).

Таким образом, при параллельном соединении емкостных и индуктивных элементов для нахождения эквивалентной емкости цепи емкости отдельных элементов складываются, а

эквивалентная обратная индуктивность цепи находится суммированием обратных индуктивностей отдельных индуктивных элементов. В частности, при  $n = 2$

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}.$$

Параллельно соединенные независимые источники тока можно заменить одним эквивалентным источником тока с задающим током, равным алгебраической сумме задающих токов отдельных источников. При этом со знаком плюс берутся задающие токи, совпадающие по направлению с задающим током эквивалентного источника, а со знаком минус — не совпадающие (рис. 1.21).

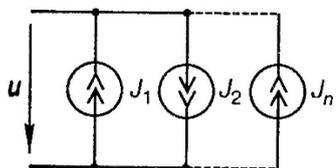


Рис. 1.21

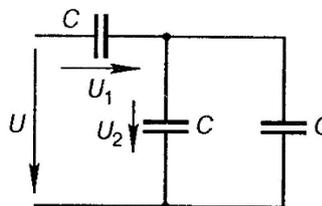
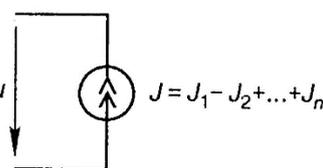


Рис. 1.22

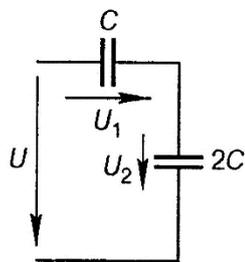


Рис. 1.23

Определить напряжение  $U_1$  в цепи (рис. 1.22) при  $U = 60$  В и  $C = 20$  мкФ.

К цепи, состоящей из емкостных элементов, приложено постоянное напряжение, следовательно, токи ветвей цепи будут равны нулю. Входное напряжение распределится между емкостным элементом на входе цепи  $C$  и емкостным элементом, эквивалентным двум параллельно включенным емкостям,  $C_{\text{экв}} = 2C$  (рис. 1.23).

При последовательном соединении емкостных элементов напряжения на них распределяются обратно пропорционально значениям емкостей:

$$U_1 : U_2 = C_{\text{экв}} : C_1 = 2$$

Учитывая, что  $U = U_1 + U_2$ , получаем  $U_1 = 40$  В.

### Тема 1.7. Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора базируется на теореме об активном двухполюснике и обычно используется в том случае, когда необходимо найти реакцию цепи (ток или напряжение) в одной ветви. При этом удобно всю остальную часть цепи, к которой подключена данная ветвь, рассматривать в виде активного двухполюсника.

Различают две модификации теоремы об активном двухполюснике: теорема об эквивалентном источнике напряжения и теорема об эквивалентном источнике тока.

Теорема об эквивалентном источнике напряжения: *ток в любой ветви линейной электрической цепи не изменится, если активный двухполюсник, к которому подключена данная ветвь, заменить эквивалентным источником напряжения (ЭДС) с задающим напряжением (ЭДС), равным напряжению холостого хода на зажимах разомкнутой ветви, и внутренним сопротивлением, равным эквивалентному входному сопротивлению пассивного двухполюсника со стороны разомкнутой ветви.*

Теорема об эквивалентном источнике тока: *ток в любой ветви линейной электрической цепи не изменится, если активный двухполюсник, к которому подключена данная ветвь, заменить эквивалентным источником тока с задающим током, равным току короткого замыкания этой*

ветви, и внутренней проводимостью, равной эквивалентной входной проводимости пассивного двухполюсника со стороны разомкнутой ветви.

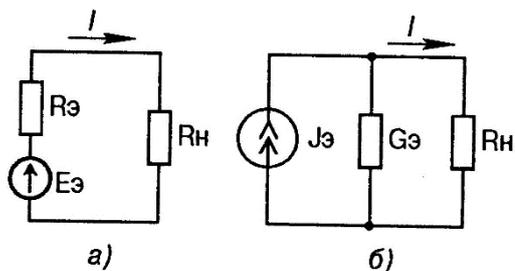


Рис. 1.24

Таким образом, часть электрической цепи с отключенной ветвью, в которой необходимо найти ток, может быть представлена в виде двух эквивалентных схем: либо источника напряжения (см. рис. 1.2,б), либо источника тока (см. рис. 1.2,г).

В соответствии с теоремами об эквивалентных источниках ЭДС или задающее напряжение источника определяется как напряжение холостого хода на разомкнутых зажимах активного двухполюсника  $E_э = U_{ХХ}$  или  $U_э = U_{ХХ}$ , а задающий ток источника тока как ток короткого замыкания  $J_э = I_{кз}$ . Внутреннее сопротивление активного двухполюсника  $R_э$  или его проводимость  $G_э$  находятся как эквивалентные входные сопротивление или проводимость относительно разомкнутых зажимов пассивного двухполюсника, который получается после исключения из схемы всех источников напряжения и тока. При этом идеальные источники напряжения закорачиваются (заменяются участком с нулевым сопротивлением), а тока — размыкаются (заменяются участком с бесконечным сопротивлением); реальные же источники заменяются своими внутренними сопротивлениями или проводимостями.

После нахождения параметров эквивалентного генератора напряжения или тока ток  $I$  в нагрузке можно найти для схемы на рис. 1.24,а по формуле

$$I = \frac{U_э}{R_э + R_н} = \frac{U_{ХХ}}{R_э + R_н} \quad (1.31)$$

и для схемы на рис. 1.24,б по формуле

$$I = J_э \frac{R_э}{R_э + R_н} = I_{кз} \frac{G_{ХХ}}{G_э + G_н} \quad (1.32)$$

### Тема 1.8. Метод наложения

В основе метода наложения лежит принцип суперпозиции (наложения): напряжения и токи в отдельных ветвях цепи равны алгебраической сумме соответственно напряжений и токов в данных ветвях от каждого напряжения (ЭДС) и тока источников в отдельности. Этот метод применяется в случае, когда в цепи действует несколько источников напряжения или тока. При этом рассчитывают частичные токи и напряжения от каждого из источников, включенных в цепи, а результирующие токи и напряжения определяют путем алгебраического суммирования частичных токов и напряжений. При этом, когда ведется расчет токов и напряжений, вызванных каким-либо одним источником напряжения (ЭДС) или тока, воздействие остальных источников считается равным нулю, т.е. остальные источники напряжения (ЭДС) в схеме заменяются короткозамкнутыми участками, а ветви с источниками тока размыкаются.

### Тема 1.9. Метод узловых потенциалов

Данный метод расчета цепей базируется на первом законе Кирхгофа и законе Ома. Он позволяет уменьшить количество независимых уравнений системы до числа, равного количеству узлов без одного:  $N_y - 1$ .





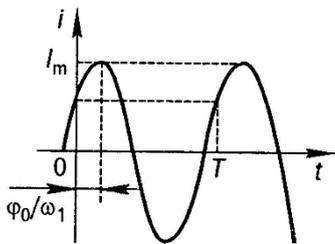


Рис. 2.1

го тока

Величина, обратная периоду, называется циклической частотой  $f = 1/T$ . Угловая и циклическая частоты связаны между собою:

$$\omega = 2\pi f.$$

Единицей измерения циклической частоты  $f$  является герц (Гц), угловой частоты  $\omega$  — радиан в секунду (рад/с). Так как радиан — величина безразмерная, то  $\omega$  измеряется в 1/с или с<sup>-1</sup>.

Важными параметрами гармонических колебаний являются их действующее и среднее значения. Действующее значение гармонического

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (2.4)$$

Здесь  $i = i(t)$  — мгновенное значение гармонического тока.

Подставив значение  $i$  из (2.1) в (2.4), после интегрирования получим

$$I = I_m / \sqrt{2} \approx 0,707 I_m. \quad (2.5)$$

Аналогично определяются мгновенное и действующее значения напряжения и ЭДС:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0); & U &\approx 0,707 U_m; \\ e(t) &= E_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0); & E &\approx 0,707 E_m. \end{aligned}$$

Действующие значения токов и напряжений (ЭДС) называют еще их среднеквадратическими значениями.

Среднее значение гармонического тока

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt. \quad (2.6)$$

Подставив значение  $i(t)$  из (2.1) в (2.6), получим, что  $I_{\text{ср}} = 0$ , соответственно  $U_{\text{ср}} = 0$  и  $E_{\text{ср}} = 0$ .

Рассмотрим гармонические колебания в резистивных, индуктивных и емкостных элементах.

**Резистивные элементы.** Пусть к резистивному элементу  $R$  приложено гармоническое напряжение

$$u(t) = U_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0). \quad (2.7)$$

Согласно закону Ома через элемент  $R$  будет протекать ток

$$i(t) = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \cos(\omega_1 t + \varphi_0) = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_i). \quad (2.8)$$

Начальная фаза тока равна начальной фазе приложенного напряжения:  $\varphi_i = \varphi_0$ . Таким образом, напряжение  $u$  и ток  $i$  в резистивном элементе совпадают по фазе друг с другом (рис. 2.2,а). Средняя за период  $T$  мощность, выделяемая в резисторе  $R$ ,

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = UI = I^2 R = U^2 G. \quad (2.9)$$

**Индуктивные элементы.** Под действием напряжения (2.7) в индуктивном элементе будет протекать ток

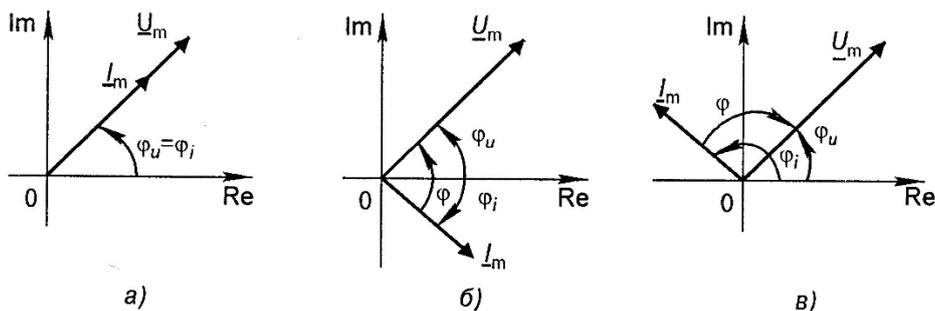


Рис. 2.2

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u dt = \frac{1}{\omega_1 L} U_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0 - \pi/2) = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_i), \quad (2.10)$$

где  $I_m = U_m / (\omega L) = U_m / X_L$ ;  $X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление;  $\varphi_i = \varphi_0 - \pi/2$  — начальная фаза тока.

Величину, обратную  $X_L$ , называют индуктивной проводимостью  $B_L = 1 / (\omega L)$ . Как следует из полученных выражений, ток в индуктивности отстает от приложенного напряжения на  $\pi/2$ , т.е. фазовый сдвиг между током  $i$  и напряжением  $u$  (рис. 2.2,б)

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_i = \pi/2. \quad (2.11)$$

На векторной диаграмме фазовый сдвиг  $\varphi$  откладывается от вектора тока к вектору напряжения. Средняя за период мощность в индуктивном элементе равна нулю.

**Емкостные элементы.** Для емкостного элемента при том же приложенном напряжении имеем:

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = \omega_1 C U_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0 + \pi/2) = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_i), \quad (2.12)$$

где  $I_m = \omega_1 C U_m = |B_C| U_m$ ;  $B_C = -\omega_1 C$  — емкостная проводимость;  $\varphi_i = \varphi_0 + \pi/2$  — начальная фаза тока. Величину, обратную  $B_C$ , называют емкостным сопротивлением  $X_C = -1 / (\omega C)$ . Фазовый сдвиг между током и напряжением на емкостном элементе

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_i = -\pi/2. \quad (2.13)$$

Ток в емкости опережает приложенное напряжение на угол  $\pi / 2$  (рис. 2.2,в), так как знак минус свидетельствует об отставании напряжения  $u$  от тока  $i$ . Средняя за период мощность в емкостном элементе также равна нулю.

## Тема 2.2. Комплексные величины

Наиболее широкое распространение получило представление гармонических колебаний с помощью комплексных чисел. Представим ток  $i(t)$ , определяемый формулой (2.1), на комплексной плоскости, т.е. изобразим на комплексной плоскости вектор  $I_m$  с учетом начальной фазы  $\varphi_0$  (рис. 2.5). Чтобы отобразить изменение текущей фазы, будем вращать этот вектор в положительном направлении (против часовой стрелки) с угловой частотой  $\omega_1$ . Тогда в любой момент времени

положение вращающегося вектора определится комплексной величиной (комплексным гармоническим колебанием):

$$\underline{i}(t) = I_m e^{j(\omega_1 t + \varphi_0)} = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0) + jI_m \sin(\omega_1 t + \varphi_0), \quad (2.14)$$

где  $I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$  отражает проекцию вращающегося вектора на вещественную ось, а  $jI_m \sin(\omega_1 t + \varphi_0)$  — на мнимую ось.

Таким образом, гармонический ток  $i(t) = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$  может быть представлен в виде проекции вращающегося вектора на вещественную ось комплексной плоскости:

$$i = \operatorname{Re}[I_m e^{j(\omega_1 t + \varphi_0)}] = \operatorname{Re}[\underline{I}_m e^{j\omega_1 t}], \quad (2.15)$$

где  $\operatorname{Re}$  — сокращенное обозначение слова *Realis* (действительный, вещественный).

Если гармоническое колебание задается в виде  $i(t) = I_m \sin(\omega_1 t + \varphi_0)$ , то на комплексной плоскости этому току соответствует проекция вектора на мнимую ось

$$i = \operatorname{Im}[I_m e^{j(\omega_1 t + \varphi_0)}] = \operatorname{Im}[\underline{I}_m e^{j\omega_1 t}], \quad (2.16)$$

где  $\operatorname{Im}$  — сокращенное обозначение слова *Imaginaris* (мнимый).

Величина  $\underline{I}_m$  носит название комплексной амплитуды тока:

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\varphi_0}. \quad (2.17)$$

Важным свойством комплексной амплитуды является то, что она полностью определяет гармоническое колебание заданной частоты  $\omega_1$ , так как содержит информацию об его амплитуде и начальной фазе.

Комплексное действующее значение тока

$$\underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_0} = I e^{j\varphi_0}.$$

Для каждого комплексного числа возможны три формы представления: алгебраическая, тригонометрическая, показательная.

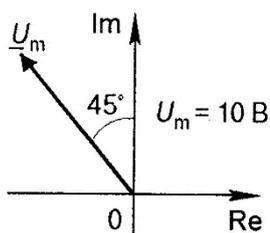


Рис. 2.6

Алгебраическая форма записи комплексного числа имеет вид  $\underline{c} = a + jb$ , тригонометрическая —  $\underline{c} = c(\cos \varphi + j \sin \varphi)$ , показательная —  $\underline{c} = c e^{j\varphi}$ , где  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$  — модуль и  $\varphi = \operatorname{arctg}(b/a)$  — аргумент комплексного числа  $\underline{c}$ . Например,

$$1 + j\sqrt{3} = 2(\cos \pi/3 + j \sin \pi/3) = 2e^{j\pi/3}.$$

Под комплексным числом, сопряженным с  $\underline{c} = a + jb$ , понимают комплексное число  $\underline{c}^*$ , которое отличается от  $\underline{c}$  только знаком мнимой части:  $\underline{c}^* = a - jb$ .

### Тема 2.3. Символическая схема

С учетом приведенных в разд. 2.1.1 соотношений между токами и напряжениями на элементах электрической цепи (2.8), (2.10), (2.12) комплексные сопротивления элементов цепи имеют вид:

$$\underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_L = j\omega L; \quad \underline{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}.$$

Множитель  $j = e^{j\pi/2}$  характеризует фазовый сдвиг между векторами тока  $\underline{I}_m$  и напряжения  $\underline{U}_m$ .

При составлении символической схемы (схемы в комплексной области) необходимо заменить элементы исходной схемы (схемы во временной области) их комплексными эквивалентными сопротивлениями. При этом в полученной символической схеме можно указывать (рассматривать) только комплексные значения токов и напряжений и рассчитывать их методом комплексных амплитуд.

#### Тема 2.4. Символический метод расчета цепей

*Символический метод* расчета цепей в режиме гармонических колебаний (метод комплексных амплитуд) тригонометрические операции над гармоническими колебаниями (временными функциями) сводит к алгебраическим операциям над комплексными числами, что существенно упрощает расчет. Операции дифференцирования временных функций заменяются в комплексной области умножением на  $j\omega$ , операции интегрирования — делением на  $j\omega$ . В результате перехода к комплексным числам вместо системы интегрально-дифференциальных уравнений, описывающих состояние цепи, получается система алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами, решение которой определяет комплексные значения искомых токов и напряжений.

При расчете цепей символическим методом могут быть использованы все законы и методы преобразований и анализа цепей, которые справедливы для цепей постоянного тока. Допустимость использования символического метода объясняется тем, что при гармонических воздействиях в линейных цепях устанавливаются гармонические колебания (токи и напряжения) той же частоты и их неизвестными параметрами будут лишь амплитуды и начальные фазы, определяемые однозначно их комплексными амплитудами.

Приведем основные законы электрических цепей в символической форме.

Для резистивного элемента  $R$  связь между комплексными амплитудами тока  $\underline{I}_m$  и напряжения  $\underline{U}_m$  можно определить согласно закону Ома  $u = Ri$  путем замены мгновенных значений токов  $i(t)$  и напряжений  $u(t)$  их комплексными амплитудами:

$$\underline{U}_m = R\underline{I}_m. \quad (2.18)$$

Для индуктивного элемента  $L$  связь между  $\underline{I}_m$  и  $\underline{U}_m$  определяется согласно (2.10) следующим образом:

$$\underline{I}_m = \underline{U}_m / (j\omega_1 L); \quad \underline{U}_m = j\omega_1 L \underline{I}_m = jX_L \underline{I}_m, \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) отражает закон Ома в комплексной форме для индуктивных элементов.

Для емкостного элемента  $C$  связь между  $\underline{I}_m$  и  $\underline{U}_m$  определяется согласно (2.12):

$$\underline{I}_m = j\omega_1 C \underline{U}_m, \quad \text{или} \quad \underline{U}_m = -j\frac{1}{\omega_1 C} \underline{I}_m = jX_C \underline{I}_m, \quad (2.20)$$

Полученные уравнения (2.18)—(2.20) справедливы и для комплексных действующих значений токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \text{для } R: \underline{I} &= \underline{U}/R = G\underline{U}; \\ \text{для } L: \underline{I} &= \underline{U}/jX_L = -jB_L \underline{U}; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\text{для } C: \underline{I} = \underline{U} / (jX_C) = -jB_C \underline{U},$$

$$\text{где } \underline{I} = I_m / \sqrt{2}; \quad \underline{U} = U_m / \sqrt{2}.$$

Заменяя мгновенные значения токов ветвей  $i_k$  и напряжений  $u_k$  их комплексными амплитудами  $I_{mk}$  и  $U_{mk}$  соответственно, получим законы Кирхгофа в комплексной форме:

$$\sum_{k=1}^m I_{mk} = 0, \quad \sum_{k=1}^n U_{mk} = 0. \quad (2.22)$$

Поскольку все методы расчета цепей (метод контурных токов, узловых потенциалов, наложения и др.) базируются на законах Ома и Кирхгофа, то все эти методы могут использоваться и при комплексной форме записи с заменой соответствующих величин (токов, напряжений, сопротивлений, проводимостей) их комплексными значениями.

### Тема 2.5. Баланс мощностей

В режиме гармонических колебаний на входе пассивного двухполюсника действует напряжение  $u(t) = U_m \cos(\omega_1 t)$ , под воздействием которого в цепи протекает ток  $i(t) = I_m \cos(\omega_1 t - \varphi)$ . Отдаваемая источником в цепь за период  $T$  средняя мощность

$$p = P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi = UI \cos \varphi. \quad (2.23)$$

Учитывая, что  $U = ZI$  и  $R = Z \cos \varphi$ , уравнение (2.23) принимает вид

$$p = I^2 R = U^2 G. \quad (2.24)$$

Таким образом, средняя за период  $T$  мощность  $P$  равна мощности, рассеиваемой на резистивном сопротивлении (проводимости) цепи. Мощность  $P$  носит название *активной* и измеряется в ваттах (Вт).

Для расчета мощности в режиме гармонических колебаний можно пользоваться символическим методом, введя понятие комплексной мощности:

$$\underline{S} = \underline{UI}^* = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi. \quad (2.25)$$

Комплексную мощность можно записать в алгебраической форме:

$$\underline{S} = P + jQ, \quad (2.26)$$

где  $P$  — активная мощность;  $Q$  — реактивная мощность, В,

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X = U^2 B. \quad (2.27)$$

Модуль комплексной мощности называется полной мощностью:

$$S = |\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.28)$$

Единица измерения реактивной мощности — ВАр, а полной — вольт-ампер (В • А).

Из формул (2.25)-(2.28) видно, что

$$P = \operatorname{Re}[UI^*] = \operatorname{Re}[\underline{S}]; \quad Q = \operatorname{Im}[UI^*] = \operatorname{Im}[\underline{S}]; \quad S = UI = |\underline{S}|,$$

т.е. активная мощность равна реальной части, а реактивная — мнимой части комплексной мощности  $\underline{S}$ .

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P/S. \quad (2.29)$$

При  $\cos \varphi = 1$   $P = S$  и  $Q = 0$ , т.е. цепь носит чисто резистивный характер и сдвиг фаз между током  $i(t)$  и направлением  $u(t)$  равен нулю.

К комплексной мощности применима теорема Теллегена в комплексной форме:

$$\sum_{k=1}^n \underline{U}_k \underline{I}_k^* = \sum_{k=1}^n \underline{S}_k = 0. \quad (2.30)$$

Уравнение (2.30) отражает баланс комплексных мощностей: сумма комплексных мощностей всех  $n$  ветвей цепи равна нулю. Равенство (2.30) можно записать и в другой форме: сумма комплексных мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равна сумме комплексных мощностей, потребляемых остальными ветвями электрической цепи:

$$\sum_{k=1}^n \underline{S}_{k \text{ ист}} = \sum_{k=1}^n \underline{S}_{k \text{ пот}}. \quad (2.31)$$

Из условий баланса комплексных мощностей следует условия баланса активных и реактивных мощностей:

$$\sum_{k=1}^n P_{k \text{ ист}} = \sum_{k=1}^n P_{k \text{ пот}}. \quad (2.32)$$

$$\sum_{k=1}^n Q_{k \text{ ист}} = \sum_{k=1}^n Q_{k \text{ пот}}. \quad (2.33)$$

## Тема 2.6. Комплексная передаточная функция

Важнейшей характеристикой линейной электрической цепи является ее комплексная передаточная функция  $H(j\omega)$ . Представим электрическую цепь в виде четырехполюсника (рис. 2.11). Комплексная передаточная функция цепи определяется как отношение комплексной амплитуды реакции цепи к комплексной амплитуде входного воздействия.

В зависимости от типов входного воздействия и реакции цепи различают следующие виды  $H(j\omega)$ .

1. Комплексная передаточная функция по напряжению

$$H_u(j\omega) = \underline{U}_{m2}/\underline{U}_{m1} = \underline{U}_2/\underline{U}_1, \quad (2.34)$$

где  $\underline{U}_{m1}$ ,  $\underline{U}_{m2}$ ,  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$  — комплексные амплитуды и комплексные действующие значения напряжения воздействия на входе и напряжения реакции на выходе.

2. Комплексная передаточная функция по току

$$H_i(j\omega) = \underline{I}_{m2}/\underline{I}_{m1} = \underline{I}_2/\underline{I}_1, \quad (2.35)$$

где  $\underline{I}_{m1}$ ,  $\underline{I}_{m2}$ ,  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_2$  — комплексные амплитуды и действующие значения тока воздействия и тока реакции.

3. Комплексное передаточное сопротивление

$$H_Z(j\omega) = \underline{U}_{m2}/\underline{I}_{m1} = \underline{U}_2/\underline{I}_1. \quad (2.36)$$

4. Комплексная передаточная проводимость

$$H_Y(j\omega) = \underline{I}_{m2}/\underline{U}_{m1} = \underline{I}_2/\underline{U}_1. \quad (2.37)$$

Из данных определений следует, что  $H_u(j\omega)$  и  $H_i(j\omega)$  являются безразмерными величинами, а  $H_Z(j\omega)$  и  $H_Y(j\omega)$  имеют соответственно размерности сопротивления и проводимости.

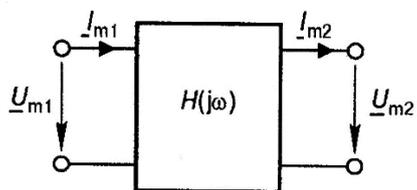


Рис. 2.11

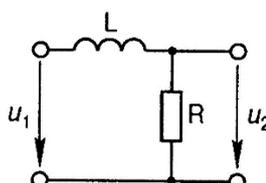


Рис. 2.12

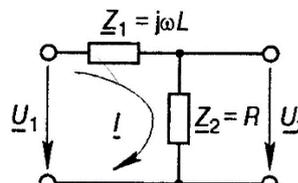


Рис. 2.13

Комплексные передаточные функции цепи являются функцией частоты со сигнала воздействия и зависят только от параметров цепи.

Как всякую комплексную величину  $H(j\omega)$ , можно представить в показательной, тригонометрической и алгебраической форме:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}; \quad (2.38)$$

$$H(j\omega) = H(\omega) \cos \varphi(\omega) + jH(\omega) \sin \varphi(\omega); \quad (2.39)$$

$$H(j\omega) = \text{Re}(H(j\omega)) + j\text{Im}(H(j\omega)); \quad (2.40)$$

Наряду с передаточными функциями (2.34)-(2.37) при анализе цепей находят применение комплексные функции, определяющиеся отношением комплексной реакции к комплексному воздействию на входе электрической цепи (см. рис. 2.11):

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = \underline{U}_1/\underline{I}_1; \quad Y_{\text{вх}}(j\omega) = \underline{I}_1/\underline{U}_1.$$

Эти функции носят название комплексных входных функций цепи.

## Тема 2.7. Частотные характеристики цепей

Представим комплексную передаточную функцию в показательной форме:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

Модуль комплексной передаточной функции  $H(j\omega) = |H(j\omega)|$  называется амплитудно-частотной характеристикой цепи (АЧХ), аргумент комплексной передаточной функции  $\varphi(\omega) = \arg(H(j\omega))$  — фазо-частотной характеристикой цепи (ФЧХ).

Таким образом, амплитуда сигнала на выходе цепи определяется АЧХ (модулем комплексной передаточной функции), а фаза — ФЧХ (аргументом комплексной передаточной функции):

$$U_2(\omega) = H_u(\omega)U_1(\omega); \tag{2.42}$$

$$\varphi_{u2}(\omega) = \varphi_H(\omega) + \varphi_{u1}(\omega).$$

Если обозначить вещественную и мнимую части комплексной передаточной функции цепи:

$$H_1(\omega) = \operatorname{Re}(H(j\omega)) = H(\omega) \cos \varphi(\omega);$$

$$H_2(\omega) = \operatorname{Im}(H(j\omega)) = H(\omega) \sin \varphi(\omega),$$

то АЧХ и ФЧХ будут связаны с вещественной и мнимой частями комплексной передаточной функции  $H_1(\omega)$  и  $H_2(\omega)$  соотношениями:

$$H(\omega) = \sqrt{H_1^2(\omega) + H_2^2(\omega)}; \tag{2.43}$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{H_2(\omega)}{H_1(\omega)}. \tag{2.44}$$

Если необходимо для цепи построить графики АЧХ в общем случае, то для цепей первого порядка достаточно на основе анализа схемы получить значения АЧХ при  $\omega = 0, \omega \rightarrow \infty$  и по двум точкам построить график. ФЧХ для некоторых цепей также легко построить по двум точкам, а в случае отсутствия такой возможности достаточно проанализировать характер цепи на промежуточных частотах.

### Тема 2.8. Колебательные контуры и их параметры

Простейший колебательный контур содержит индуктивный и емкостный элементы, соединенные последовательно (последовательный контур) или параллельно (параллельный контур). В последовательном контуре возникает резонанс напряжений, а в параллельном — резонанс токов.

Резонансом называют такое состояние пассивной электрической цепи, состоящей из разнохарактерных реактивных элементов, при котором фазовый сдвиг между входным током и входным напряжением равен нулю. При этом входное реактивное сопротивление и/или входная реактивная проводимость цепи равны нулю.

Частоту, на которой наблюдается явление резонанса, называют *резонансной*.

На рис. 2.17 изображена схема последовательного контура, к которому приложено гармоническое напряжение с частотой  $\omega$ .

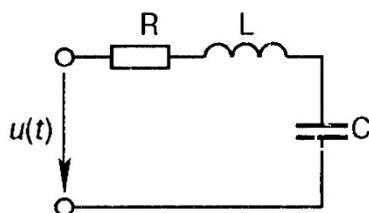


Рис. 2.17

Комплексное входное сопротивление контура на данной частоте

$$\underline{Z} = R + jX = R + j(\omega L - 1/\omega C). \quad (2.45)$$

При резонансе  $X = 0$  или  $\omega_0 L - 1/\omega_0 C$ , отсюда получаем уравнение резонансной частоты  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (2.46)$$

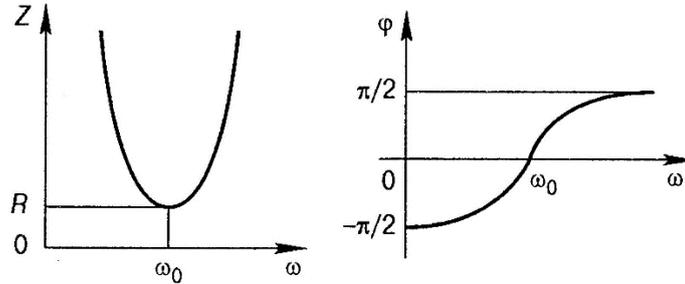


Рис. 2.18

На резонансной частоте сопротивление контура носит чисто резистивный характер, т.е.  $\underline{Z} = R$ , ток совпадает по фазе с приложенным напряжением и достигает максимального значения  $I_0 = U/R$ . Сопротивления индуктивности и емкости на резонансной частоте  $\omega_0$  равны друг другу:

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = p. \quad (2.47)$$

Величина  $p$  называется характеристическим сопротивлением контура.

Резонансные свойства контура характеризуются его добротностью, которая в общем случае определяется как

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{p}{R}. \quad (2.48)$$

Отношение действующих значений напряжений на реактивных элементах ( $L$  и  $C$ ) к действующему значению приложенного напряжения при резонансе

$$\frac{U_{L_0}}{U} = \frac{U_{C_0}}{U} = \frac{I_0 \omega_0 L}{U} = \frac{I_0}{\omega_0 C U} = \frac{p}{R} = Q. \quad (2.49)$$

Таким образом, добротность  $Q$  показывает, во сколько раз напряжения на реактивных элементах превышают приложенное напряжение на резонансной частоте.

На рис. 2.18 изображены зависимости  $Z(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$ , определяемые формулами:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad \varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right). \quad (2.50)$$

Из представленных характеристик следует, что при  $\omega < \omega_0$  цепь имеет емкостный характер ( $\varphi < 0$ ) и ток опережает по фазе приложенное напряжение, при  $\omega > \omega_0$  характер цепи индуктивный ( $\varphi > 0$ ) и ток отстает по фазе от приложенного напряжения; при  $\omega = \omega_0$  наступает резонанс напряжений ( $\varphi = 0$ ) и ток совпадает по фазе с приложенным напряжением. Полное сопротивление цепи принимает при резонансе минимальное значение  $Z = R$ .

Зависимость действующего значения тока от частоты определяется уравнением

$$I(\omega) = U/Z = U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (2.51)$$

Анализ зависимости  $I(\omega)$  показывает, что ток достигает максимума при резонансе  $\omega = \omega_0$  и равен

$$I_0 = U/R. \quad (2.52)$$

Комплексные передаточные функции по напряжению для элементов  $C$  и  $L$  равны:

$$H_C(j\omega) = \frac{U_C}{U} = \frac{1}{j\omega C[R + j(\omega L - 1/\omega C)]}; \quad (2.53)$$

$$H_L(j\omega) = \frac{U_L}{U} = \frac{j\omega L}{R + j(\omega L - 1/\omega C)}. \quad (2.54)$$

Из уравнений (2.53) и (2.54) можно получить АЧХ и ФЧХ последовательного контура:

$$H_C(\omega) = |H_C(j\omega)| = \frac{1}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \quad (2.55)$$

$$H_L(\omega) = |H_L(j\omega)| = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}};$$

$$\varphi_C(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right); \quad (2.56)$$

$$\varphi_L(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right).$$

Зависимости  $I(\omega)$ ,  $H_L(\omega)$ ,  $H_C(\omega)$  называются резонансными характеристиками.

На рис. 2.19 приведены графики АЧХ и ФЧХ последовательного контура, определяемые формулами (2.55), (2.56).

Максимальные значения  $H_C(\omega)$  и  $H_L(\omega)$  достигаются на частотах  $\omega_C$  и  $\omega_L$ , которые могут быть определены из уравнений:

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2 - 1}{2Q^2}}; \quad \omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2 + 1}{2Q^2}}. \quad (2.57)$$

При этом АЧХ  $H_C(\omega)$  и  $H_L(\omega)$  примут максимальные значения, равные

$$H_{Cm} = H_{Lm} = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2 - 1}} = \frac{2}{d\sqrt{4 - d^2}}. \quad (2.58)$$

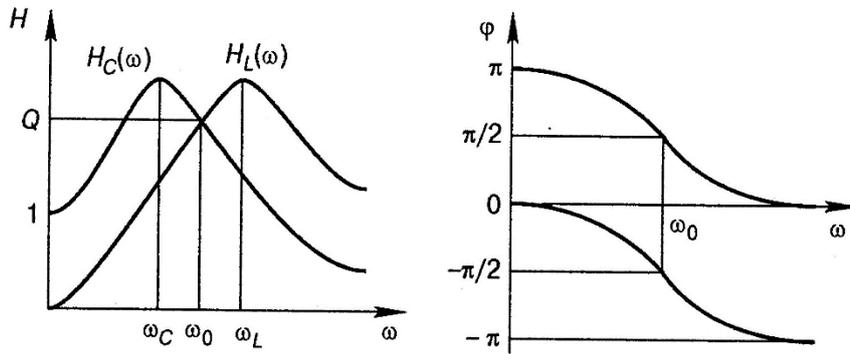


Рис. 2.19

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением добротности  $Q$  (уменьшением затухания  $d$ ) частоты  $\omega_C$  и  $\omega_L$  сближаются с резонансной частотой  $\omega_0$ . При этом  $H_{Cm}$  и  $H_{Lm}$  возрастают.

Степень отклонения частоты воздействия от резонансной частоты принято оценивать абсолютной, относительной и обобщенной расстройками. Расстройки определяются следующим образом:

абсолютная

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 \text{ или } \Delta f = f - f_0; \quad (2.59)$$

относительная

$$\delta = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0; \quad (2.60)$$

обобщенная

$$\xi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right). \quad (2.61)$$

Важной характеристикой колебательного контура является полоса пропускания. В общем случае абсолютной полосой пропускания называют диапазон частот, в пределах которого резонансная характеристика уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с ее максимальным значением.

Абсолютная полоса пропускания

$$\Delta f_{\Pi} = f_2 - f_1, \quad (2.62)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания,

$$f_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{2\pi} = \frac{f_0}{2Q} \left( \sqrt{1 + 4Q^2 \mp 1} \right). \quad (2.63)$$

Из вышеизложенного следует, что на границе полосы пропускания  $\xi_{1,2} = \pm 1$  и  $\varphi = \pm 45^\circ$ .

Абсолютную и относительную полосу пропускания  $\Delta f_{\Pi}$  можно выразить через добротность  $Q$ :

$$\Delta f_{\Pi} = f_2 - f_1 = f_0/Q.$$

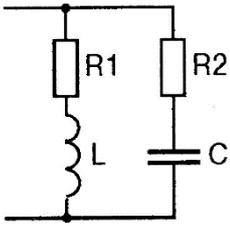


Рис. 2.20

Формула (2.64) показывает, что чем выше добротность  $Q$ , тем меньше полоса пропускания) и наоборот. Следует отметить, что подключение к контуру сопротивления нагрузки приводит к увеличению резистивных потерь контура и, следовательно, к уменьшению его добротности и расширению полосы пропускания.

Простейший параллельный колебательный контур с потерями в ветвях  $R_1$  и  $R_2$  имеет вид, изображенный на рис. 2.20. Комплексная входная проводимость такого контура

$$\underline{H} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 + G_2 - j(B_1 + B_2) = G - jB, \quad (2.64)$$

где  $\underline{Y}_1 = G_1 - jB_1$ ;  $\underline{Y}_2 = G_2 - jB_2$  — комплексные проводимости ветвей с индуктивностью и емкостью соответственно. Проводимости  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  можно найти из формул:

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}; \quad B_1 = \frac{\omega L}{Z_1^2}; \quad B_2 = -\frac{1/\omega C}{Z_1^2}, \quad (2.65)$$

где  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}$ ;  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (1/\omega C)^2}$ .

Из условий резонанса токов  $B = 0$ . Отсюда следует, что

$$B_1 + B_2 = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} - \frac{1/\omega C}{R_2^2 + (1/\omega C)^2} = 0. \quad (2.66)$$

Решив (2.66) относительно  $\omega$ , получим уравнение резонансной частоты:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{p^2 - R_1^2}{p^2 - R_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{p^2 - R_1^2}{p^2 - R_2^2}}. \quad (2.67)$$

Из уравнения (2.67) следует, что резонанс в параллельном контуре возможен лишь в случае, когда подкоренное выражение положительно ( $R_1 < p$  и  $R_2 < p$  или  $R_1 > p$  и  $R_2 > p$ ).

Реактивные составляющие токов в ветвях при резонансе равны друг другу:

$$I_{p1} = UB_1 = I_{p2} = U|B_2|. \quad (2.68)$$

При этом ток в неразветвленной части цепи определяется из уравнения

$$I_0 = UG_{0э} = U/R_{0э}, \quad (2.69)$$

где  $G_{0э}$  и  $R_{0э}$  называют эквивалентными резонансными проводимостью и сопротивлением параллельного контура соответственно:

$$G_{0э} = (R_1 + R_2)/(p^2 + R_1R_2); \quad (2.70)$$

$$R_{0э} = (p^2 + R_1R_2)/(R_1 + R_2). \quad (2.71)$$

Наибольший теоретический и практический интерес представляет резонанс токов в контурах без потерь и с малыми потерями.

Для контура без потерь ( $R_1 = R_2 = 0$ ) уравнение резонансной частоты (2.67) примет вид

$$\omega_p = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad (2.72)$$

т.е. совпадает с выражением (2.46) для последовательного контура. Эквивалентное сопротивление контура без потерь  $R_{0э} = \infty$ , входной ток равен нулю, а добротность обращается в бесконечность. Комплексы действующих значений токов в ветвях

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{j\omega_0 L} = \frac{U}{p} e^{-j\pi/2}; \quad \underline{I}_2 = Uj\omega_0 C = \frac{U}{p} e^{-j\pi/2}, \quad (2.73)$$

т.е. ток в индуктивности отстает от приложенного напряжения на  $\pi / 2$ , а в емкости опережает на  $\pi / 2$ .

При  $\omega < \omega_0$  входное сопротивление контура носит индуктивный, а при  $\omega > \omega_0$  емкостный характер, причем вследствие отсутствия потерь при переходе через  $\omega = \omega_0$  ФЧХ

контура изменяется скачком от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ , а входное сопротивление контура претерпевает разрыв ( $Z = \infty$ ). Частотная зависимость входного тока определяется уравнением

$$I(\omega) = U|B(\omega)|. \quad (2.74)$$

Контур, для которого выполняются условия  $R_1 \ll p$ ;  $R_2 \ll p$ , называется контуром с малыми потерями. Резонансная частота для этого случая будет приблизительно совпадать с частотой  $\omega_0$ . Для контура с малыми потерями можно принять, что  $p^2 \gg R_1 R_2$ , тогда

$$R_{0\varepsilon} \approx p^2 / (R_1 + R_2) = p^2 / R = Q^2 R = Q_p = L / RC, \quad (2.75)$$

где  $R = R_1 + R_2$ . Ток в неразветвленной части цепи на резонансной частоте

$$I_0 = U / R_{0\varepsilon} = U / (Q^2 R), \quad (2.76)$$

а комплексные значения токов в ветвях

$$\underline{I}_1 \approx \frac{U}{p} e^{-j\varphi_1}; \quad \underline{I}_2 \approx \frac{U}{p} e^{j\varphi_2}, \quad (2.77)$$

где

$$\varphi_1 = \text{arctg}(p/R_1); \quad \varphi_2 = \text{arctg}(p/R_2),$$

т.е. действующие значения токов в ветвях

$$I_1 = I_2 = U/p = U/(QR). \quad (2.78)$$

Из уравнений (2.76) и (2.78) следует, что отношение токов в ветвях к току в неразветвленной части цепи на резонансной частоте равно добротности контура:

$$I_1/I_0 = I_2/I_0 = Q, \quad (2.79)$$

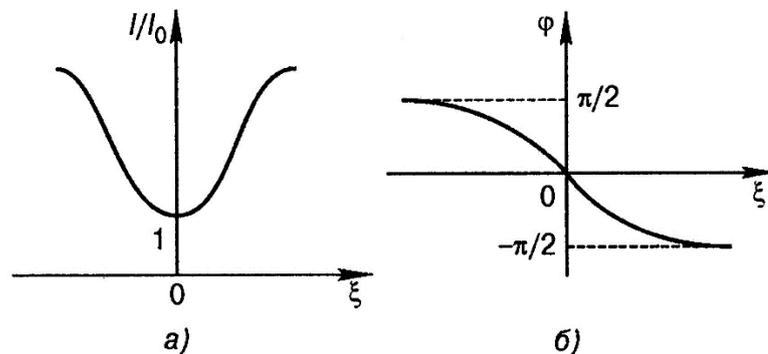


Рис. 2.21

т.е. токи в реактивных элементах  $L$  и  $C$  при резонансе в  $Q$  раз больше тока на входе контура.

Комплексное эквивалентное сопротивление контура с малыми потерями можно определить уравнением

$$Z_3(j\omega) = \frac{(R_1 + j\omega L)(R_2 + 1/j\omega C)}{R_1 + R_2 + j[\omega L - 1/(\omega C)]} \quad (2.80)$$

В режиме малых расстроек в цепи с учетом  $R_1 \ll \omega L$  и  $R_2 \ll 1/\omega C$  получаем

$$\underline{Z}_3 \approx \frac{L/C}{R + jX} = \frac{p^2}{R(1 + j\xi)} = \frac{R_{03}}{1 + j\xi'} \quad (2.81)$$

Выделяя в (2.81) активную  $R_3$  и реактивную  $X_3$  составляющие, получаем уравнения частотных характеристик:

$$R_3 = \frac{R_{03}}{1 + \xi^2}; \quad X_3 = -\frac{R_{03}\xi}{1 + \xi^2}; \quad Z_3 = \frac{R_{03}}{\sqrt{1 + \xi^2}}. \quad (2.82)$$

Фазочастотная характеристика цепи определится уравнением (рис. 2.21,б)

$$\varphi = \arctg(X_3/R_3) = -\arctg \xi. \quad (2.83)$$

Зависимость комплексного входного тока от частоты определяется из уравнения

$$\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}_3} = \frac{U}{R_{03}}(1 + j\xi) = I_0(1 + j\xi), \quad (2.84)$$

т.е. при резонансе ( $\xi = 0$ ) ток принимает минимальное значение, определяемое формулой (2.76) (рис. 2.21,а).

Частотная зависимость токов  $I_1(\omega)$  и  $I_2(\omega)$  в ветвях определяется согласно закону Ома:

$$I_1(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}; \quad I_2(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (1/\omega C)^2}}$$

т.е. ток  $I_1$  с увеличением частоты  $\omega$  уменьшается, а  $I_2$  растет. Комплексная передаточная функция по току в ветвях  $L$  и  $C$  параллельного колебательного контура определяется в соответствии с (2.35):

$$H_L(j\omega) = \frac{I_1}{\underline{I}} = \frac{R_2 + 1/(j\omega C)}{R + j[\omega L - 1/(\omega C)]}; \quad (2.85)$$

$$H_C(j\omega) = \frac{I_2}{\underline{I}} = \frac{R_1 + j\omega L}{R + j[\omega L - 1/(\omega C)]}. \quad (2.86)$$

Отсюда получаем АЧХ и ФЧХ комплексной передаточной функции по току для контура с малыми потерями:

$$H_L(\omega) = \frac{\sqrt{R_2^2 + 1/(\omega C)^2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \approx \frac{1}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \quad (2.87)$$

$$H_C(\omega) = \frac{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \approx \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \quad (2.88)$$

$$\varphi_L(\omega) = -\pi/2 - \arctg[(\omega L - 1/\omega C)/R]; \quad (2.89)$$

$$\varphi_C(\omega) = \pi/2 - \arctg[(\omega L - 1/\omega C)/R]. \quad (2.90)$$

В контуре с малыми потерями при резонансе АЧХ принимают значения:

$$H_L(\omega_0) = H_C(\omega_0) = (1/\omega_0 C)/R = \omega_0 L/R = p/R = Q. \quad (2.91)$$

### Раздел 3. Режим негармонических воздействий

#### Тема 3.1. Классический метод анализа

##### 3.1.1. Правила коммутации

При переходе электрической цепи из одного установившегося режима в другой (с другими параметрами) возникает переходный режим, который характеризуется нестационарным, неустановившимся или переходным процессом.

Целенаправленная коммутация в электрической цепи осуществляется при помощи ключей. При анализе электрических цепей все коммутационные устройства (ключи) считаются идеальными. Идеальный ключ — это двухполюсник, у которого в замкнутом состоянии сопротивление равно нулю, а в разомкнутом — бесконечности, причем переход из одного состояния в другое происходит мгновенно.

Принято схемы с ключами изображать до момента коммутации. Момент коммутации обозначается  $t = t_0$ , часто  $t_0 = 0$ .

Резистивная цепь при коммутации переходит из одного режима в другой мгновенно, а электрическая цепь с реактивными элементами ( $L$ ,  $C$ ) обладает инерционностью, связанной со способностью индуктивности и емкости запасать, а затем отдавать электрическую энергию.

Поведение реактивных элементов в момент коммутации определяется законами коммутации. При конечных по величине воздействиях напряжение на емкости и ток через индуктивность являются непрерывными функциями времени, т.е.

$$u_c(t_0 + 0) = u_c(t_0 - 0) = u_c(t_0); \quad i_L(t_0 + 0) = i_L(t_0 - 0) = i_L(t_0). \quad (3.1)$$

где  $(t_0 \pm 0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (t_0 \pm \Delta t)$  — момент после (знак плюс) и до (минус) коммутации.

Если коммутация происходит в момент времени  $t_0 = 0$ , то возможна запись законов коммутации в виде:

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = u_c(0); \quad i_L(0_+) = i_L(0_-) = i_L(0). \quad (3.2)$$

Величины  $u_c(t_0)$ ,  $i_L(t_0)$  — это значения параметров электрической цепи в момент коммутации. Поэтому они называются начальными условиями. В частности они могут быть нулевыми.

### 3.1.2. Анализ цепей первого порядка

Математической основой классического метода анализа являются обыкновенные дифференциальные уравнения, которым должны удовлетворять напряжения и токи в электрических цепях. Составление дифференциальных уравнений базируется на законах Ома и Кирхгофа. Считается, что линейные электрические цепи имеют постоянные параметры.

В задаче анализа переходного процесса классическим методом задано: электрическая цепь, уравнения элементов цепи, начальные условия, внешние воздействия (источники тока и напряжения, зависимые и независимые). Задача анализа заключается в определении параметров переходного процесса в электрической цепи.

Классический метод анализа заключается в составлении неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений электрической цепи и в их последующем решении. Поскольку рассматриваются линейные электрические цепи с постоянными параметрами, уравнения также будут линейными с постоянными коэффициентами. Известно, что решение неоднородного уравнения является суммой общего решения соответствующего однородного линейного уравнения и какого-либо частного решения неоднородного уравнения.

Общее решение однородного уравнения характеризует свободные колебания в электрической цепи; частное решение характеризует вынужденные колебания. Свободными колебаниями в электрической цепи называются изменения тока или напряжения после прекращения внешних воздействий. Вынужденными колебаниями в электрической цепи называются изменения тока или напряжения под действием только внешних источников (т.е. это установившиеся колебания, не зависящие от начальных условий); таким образом, в режиме вынужденных колебаний свободные отсутствуют. Переходные колебания — это сумма свободных и вынужденных колебаний.

Время переходного процесса определяют по уровню отклонения рассчитываемой величины от установившегося значения. Обычно этот уровень составляет 0,01...0,05. Тогда длительность переходного процесса  $T_{\text{пер}}$  будет составлять от  $3\tau$  до  $5\tau$  ( $\tau$  — постоянная времени цепи).

Простой электрической цепью, или цепью первого порядка называют цепь, которая содержит один реактивный элемент.

## Тема 3.2. Временной метод анализа

### 3.2.1. Временные характеристики цепей

Временной метод анализа электрических цепей основан на линейной теории сигналов и цепей, т.е. использует свойство линейности оператора электрической цепи. Сигнал

представляется в виде суммы элементарных функций времени: либо единичных функций, либо  $\delta$ -функций (функций Дирака).

Реакция электрической цепи на единичную функцию  $\sigma(t)$  называется переходной характеристикой этой цепи и обозначается  $g(t)$ . Реакция электрической цепи на  $\delta$ -функцию называется импульсной характеристикой цепи и обозначается  $h(t)$ . Эти две системные характеристики линейной электрической цепи лежат в основе временного метода и определяются при нулевых начальных условиях.

Сущность временного метода заключается в следующем:

- входное воздействие произвольной формы считается заданным и его можно представить в виде суммы или интеграла элементарных функций;
- заданы временные системные характеристики электрической цепи  $g(t)$  или  $h(t)$ , или если они не известны, то необходимо по заданным электрическим схемам найти их тем или иным способом (например, классическим методом);
- используя формулы Дюамеля, вычисляют сигнал на выходе электрической цепи.

Рассмотрим основные свойства временных характеристик цепи.

Для физически-реализуемых электрических цепей реакция на выходе цепи не может появиться раньше воздействия на входе. Поэтому, если на входе цепи действует единичная или  $\delta$ -функции, то на выходе будет:

$$g(t) = 0, \quad t < 0 \quad h(t) = 0, \quad t < 0. \quad (3.3)$$

Найдем связь между переходной и импульсной характеристиками цепи. Из математики известно, что

$$\sigma(t) = \int_0^t \delta(x) dx; \quad \delta(t) = \frac{d\sigma(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

Поскольку интегрирование и дифференцирование — это линейные операторы, то, используя линейность электрической цепи, получим:

$$g(t) = \int_0^t h(x) dx; \quad h(t) = \frac{dg(t)}{dt} = g'(t) + g(0)\delta(t). \quad (3.5)$$

Поэтому, если одна характеристика известна, то другую находят по формулам связи.

Определим связь между временными и частотными характеристиками цепи. Спектральная плотность  $F[\delta(t)] = 1$ , тогда в соответствии с определением комплексной передаточной функции можно найти спектральную плотность на выходе линейной электрической цепи, когда на входе ее действует  $\delta$ -функция:

$$S_2(j\omega) = S_1(j\omega)H(j\omega) = H(j\omega).$$

Далее можно найти сигнал на выходе, а это и есть импульсная характеристика:

$$h(t) = F^{-1}[S_2(j\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.6)$$

Таким образом, импульсная характеристика цепи и ее комплексная передаточная функция связаны преобразованиями Фурье:

$$h(t) = F^{-1}[S_2(j\omega)]; \quad H(j\omega) = F[h(t)].$$

Таким образом, зная  $H(j\omega)$ , можно найти импульсную характеристику, а значит, и переходную характеристику.

### 3.2.2. Интеграл Дюамеля

Интеграл Дюамеля позволяет проводить анализ переходных процессов в цепи, если известна ее переходная характеристика.

Сигнал на выходе электрической цепи может быть записан в следующем виде:

$$u_2(t) = u_1(0)g(t) + \int_0^t u_1'(x)g(t-x) dx, \quad (3.7)$$

где

$$u_1'(x) = \left. \frac{du_1(t)}{dt} \right|_{t=x}.$$

Используя теорему о свертке двух функций, можно получить другую форму интеграла Дюамеля:

$$u_2(t) = u_1(0)g(t) + \int_0^t u_1'(t-x)g(x) dx.$$

Используя понятие производной по параметру от определенного интеграла, можно получить третью форму интеграла Дюамеля:

$$u_2(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t u_1'(x)g(t-x) dx = \frac{d}{dt} \int_0^t u_1'(t-x)g(x) dx.$$

Та или иная форма интеграла Дюамеля выбирается, исходя из удобства вычислений.

Таким образом, при помощи формулы Дюамеля, зная сигнал на входе, можно определить сигнал на выходе электрической цепи, если известна переходная характеристика этой цепи.

Можно получить интеграл Дюамеля в виде формулы свертки, если воспользоваться импульсной характеристикой исследуемой цепи. Действительно, из фильтрующего свойства  $\delta$ -функции находим для входного сигнала

$$u_1(t) = \int_0^t u_1(x)\delta(t-x) dx, \quad x \in [0, t].$$

Используя определение импульсной характеристики, можно получить

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(x)h(t-x) dx. \quad (3.8)$$

Здесь использовано свойство линейности оператора. Полученная формула является сверткой входного сигнала и импульсной характеристики электрической цепи. Она позволяет рассчитать сигнал на выходе электрической цепи, если известна импульсная характеристика этой цепи.

### 3.2.3. Анализ цепей первого порядка

Далее для примера исследуем прохождение сигнала в виде одиночного прямоугольного импульса через интегрирующую цепь (рис. 3.6) временным методом.

Входной сигнал (рис. 3.7,а) можно представить следующей зависимостью:

$$u_1(t) = U_m[\sigma(t) - \sigma(t - \tau_u)],$$

где  $U_m$  — амплитуда импульса;  $\tau_u$  — длительность импульса. Тогда напряжение на выходе цепи (на емкости  $C$ ) в соответствии с определением переходной характеристики и линейностью цепи будет определяться следующим выражением:

$$u_2(t) = U_m g(t)\sigma(t) - U_m g(t - \tau_u)\sigma(t - \tau_u).$$

Переходная характеристика цепи

$$g(t) = 1 - e^{-t/\tau},$$

где  $\tau = RC$ .

Окончательно получаем

$$u_2(t) = U_m(1 - e^{-t/\tau})\sigma(t) - U_m(1 - e^{-(t-\tau_u)/\tau})\sigma(t - \tau_u).$$

При  $t \rightarrow \infty$  имеем  $u_2(\infty) \rightarrow 0$ .

Напряжение на выходе цепи изображено на рис. 3.7,б.

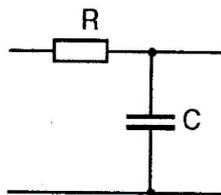


Рис. 3.6

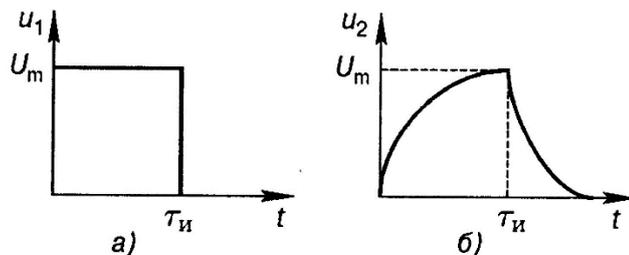


Рис. 3.7

## Тема 3.3. Операторный метод анализа

### 3.3.1. Изображение сигналов и операторные схемы замещения

Операторный метод расчета переходных процессов базируется на том, что сигнал, удовлетворяющий условию ограниченной вариации  $|s(t)| < Me^{\sigma_0 t}$ ,  $\sigma_0 > 0$ , при помощи линейного оператора преобразования Лапласа из функции действительной переменной  $t$  преобразуется в функцию комплексной переменной  $p = \sigma + j\omega$ . При этом производные и интегралы от такого сигнала будут выражаться алгебраическими функциями от  $p$  и от начальных условий. Поэтому с помощью преобразования Лапласа легко проводить алгебраизацию дифференциальных уравнений, что позволяет путем простых процедур находить решение линейных неоднородных дифференциальных уравнений, т.е. существенно упростить анализ цепи по сравнению с классическим методом.

При решении алгебраических уравнений отпадает необходимость определения постоянных дифференцирования по начальным условиям, они автоматически учитываются при алгебраизации.

Сигнал  $s(t)$  в операторном методе называется оригиналом, а соответствующая функция комплексной переменной — изображением. Изображение находится при помощи прямого преобразования Лапласа. Например, для напряжения

$$U(p) = \int_0^{\infty} u(t)e^{-pt} dt \quad (3.9)$$

оригинал находится с помощью обратного преобразования:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} U(p)e^{pt} dp. \quad (3.10)$$

В математике используются обозначения:  $L[s]$  — прямой,  $L^{-1}[s]$  — обратный операторы Лапласа.

Алгебраизация дифференциальных уравнений связана с теоремами дифференцирования и интегрирования в области изображения.

Пусть задан сигнал, удовлетворяющий условию ограниченности, и его изображение. Изображение от первой производной сигнала

$$L[s'(t)] = s(0) + pS(p),$$

где  $s(0)$  — начальная величина сигнала.

Аналогично для производной любого порядка

$$L[s^{(n)}(t)] = p^n \left\{ L[s(t)] - \frac{s(0)}{p} - \frac{s'(0)}{p^2} - \dots - \frac{s^{(n-1)}(0)}{p^n} \right\}. \quad (3.11)$$

При помощи этой формулы осуществляется алгебраизация дифференциальных уравнений. Аналогично определяется изображение интеграла от сигнала

$$L \left[ \int_0^t s(t) dt \right] = \frac{1}{p} L[s(t)] = \frac{1}{p} S(p). \quad (3.12)$$

Есть достаточно подробные таблицы преобразования Лапласа, где для данного оригинала можно найти изображение и наоборот.

Оператор Лапласа, как и оператор Фурье, является линейным. Они связаны между собой очень простой зависимостью:

$$F[s] = L[s]|_{p=j\omega}. \quad (3.13)$$

Поэтому рассмотренный ранее символический метод легко обобщается на операторный метод анализа.

Для преобразования Лапласа справедливы основные теоремы преобразования Фурье: теорема о сдвиге (запаздывании):

$$S(t - t_0)S(p) \rightarrow e^{-pt_0}; \quad (3.14)$$

теорема о свертке:

$$\int_0^t s_1(x)s_2(t-x) dx \rightarrow S_1(p)S_2(p); \quad (3.15)$$

теоремы о предельных значениях:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pS(p); \quad \lim_{t \rightarrow 0} s(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pS(p).$$

### 3.3.2. Основные законы электрических цепей в операторной форме

Если ввести понятия операторного сопротивления и операторной проводимости, то в соответствии с известными зависимостями между токами и напряжениями для элементов электрических цепей, получим

$$Z_R(p) = R; \quad Z_L(p) = pL; \quad Z_C(p) = \frac{1}{pC}. \quad (3.16)$$

Из определения операторного сопротивления находим закон Ома в операторной форме при нулевых начальных условиях ( $i_L(0) = 0, u_C(0) = 0$ ):

$$Z(p) = \frac{U(p)}{I(p)}; \quad U(p) = Z(p)I(p). \quad (3.17)$$

Аналогично записываем законы Кирхгофа в операторной форме:

$$\sum_{k=1}^m I_k(p) = 0; \quad \sum_{k=1}^n U(p) = \sum_{k=1}^n E_k(p). \quad (3.18)$$

Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме аналогичны по записи тем же законам в символьной форме.

При ненулевых начальных условиях необходимо учесть составляющие начальных условий: для индуктивности эта составляющая будет  $Li_L(0)$ , для емкостей —  $u_C(0)/p$ . Это дополнительные (внутренние) источники напряжения. Можно учесть начальные условия и в виде внутренних источников тока.

Таким образом, сущность операторного метода анализа линейных электрических цепей заключается в переходе к операторной схеме замещения с учетом начальных условий (включение при ненулевых начальных условиях дополнительных источников напряжения или тока) и к изображениям внешних воздействий. Далее, используя законы электрических цепей в операторной форме, а также весь аппарат вычислений, применяемый для расчетов установившегося режима (метод узловых потенциалов, контурных токов и так далее), находят ток или напряжение в операторной форме. По найденному изображению тока или напряжения находят его оригинал.

### 3.3.3. Операторная передаточная функция

Поскольку операторный метод по своей структуре аналогичен символическому методу, то по аналогии с комплексной передаточной функцией  $H(j\omega)$  можно ввести понятие операторной передаточной функции, или просто передаточной функции  $H(p)$ . Передаточной функцией называется отношение изображения сигнала на выходе (т.е. изображение реакции цепи) к изображению входного воздействия (т.е. входного сигнала). Обозначая воздействие индексом «1», а реакцию — «2», приходим к четырем типам передаточной функции:

$$\begin{aligned} H_u(p) &= \frac{U_2(p)}{U_1(p)}; & H_i(p) &= \frac{I_2(p)}{I_1(p)}; \\ H_Z(p) &= \frac{U_2(p)}{I_1(p)}; & H_Y(p) &= \frac{I_2(p)}{U_1(p)}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Учитывая размерность  $H_Z(p)$  и  $H_Y(p)$ , их иногда называют проходным сопротивлением и проходной проводимостью и обозначают  $Z_{12}(p)$  и  $Y_{12}(p)$ .

Передаточная функция является характеристикой электрической цепи и не зависит от входных воздействий. Очевидно, что если известна передаточная функция цепи, то легко найти реакцию этой цепи на любое входное воздействие. Например,

$$U_2(p) = H_u(p)U_1(p). \quad (3.20)$$

Процедура определения операторной передаточной функции цепи полностью аналогична поиску комплексной передаточной функции при символическом методе.

### 3.3.4. Диаграмма нулей и полюсов

Из общего выражения для передаточной функции

$$H(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}$$

следует, что это дробно-рациональная функция от переменной  $p = \sigma + j\omega$ . Если числитель этого выражения приравнять к нулю, то получается уравнение для определения нулей передаточной функции:  $A(p) = 0$ . Нуль называется корнем этого уравнения, т.е. это такое значение  $p$ , при котором передаточная функция обращается в нуль;  $p_{01}$  — первый нуль.

Если знаменатель приравнять к нулю, то получится уравнение полюсов. Оно называется характеристическим уравнением, так как по форме полностью совпадает с характеристическим уравнением соответствующего дифференциального уравнения.

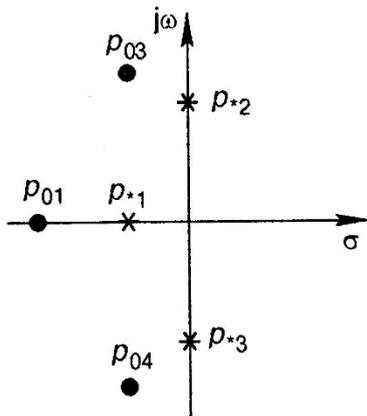


Рис. 3.10

Полюсом называется корень характеристического уравнения, т.е. значение  $p$ , при котором передаточная функция обращается в бесконечность.  $p_{*1}$  — первый полюс,  $p_{*2}$  — второй полюс и т.д.

Для анализа свойств электрической цепи по расположению нулей и полюсов на плоскости переменной  $p$  ( $p$ -плоскости) строят «нулевой портрет» (рис. 3.10). Иногда нулевой портрет называют «диаграммой нулей и полюсов».

Зная нули и полюсы, легко найти передаточную функцию

$$H(p) = K \frac{(p - p_{01})(p - p_{02}) \dots (p - p_{0n})}{(p - p_{*1})(p - p_{*2}) \dots (p - p_{*m})'}$$

где  $K = a_n/b_m$ .

Это представление обладает единственностью и называется факторизацией.

## Раздел 4. Цепи с распределенными параметрами

### Тема 4.1. Длинные линии

Линией называют пару проводов, соединяющих источник с приемником сигнала и предназначенных для передачи энергии сигнала на расстояние.

Длинной называют линию, длина которой во много раз превышает длину волны передаваемого сигнала, т.е.  $l \gg \lambda$ .

Часто линию, по которой осуществляется передача энергии высокочастотных колебаний от генератора к нагрузке, называют фидером (название происходит от английского глагола to feed – питать). В современных устройствах связи применение фидеры различных типов.

Виды длинных линий показаны на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Виды длинных линий

Воздушная линия конструктивно состоит из двух параллельных неизолированных проводов, а кабельная линия образуется парой изолированных проводов либо параллельных, либо скрученных друг с другом. Коаксиальная линия образуется полым цилиндром и

центральным проводом. Пространство между ними обычно заполняется диэлектриком. Технологичностью отличается полосковая линия, состоящая из проводящих полос разделенных диэлектриком.

В диапазоне дециметровых и более длинных волн для передачи энергии обычно используется воздушная двухпроводная линия. При передаче гармонических сигналов по воздушным линиям связи без потерь фазовая скорость волн практически равна скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, а при наличии потерь лишь немного меньше:  $V_{\Phi} = 2 \cdot 10^8$  м/с. Среднее значение волнового сопротивления для воздушных линий  $Z_B = 400 \dots 1500$  Ом.

Однако на более коротких волнах воздушная линия начинает интенсивно излучать электромагнитное поле в окружающее пространство; возрастают также тепловые потери в проводах. В дециметровом диапазоне волн наиболее широко применяется коаксиальная линия передач. В кабелях фазовая скорость волн в 2...2,5 раза меньше скорости света в вакууме. Среднее значение волнового сопротивления для кабелей  $Z_B = 50 \dots 75$  Ом. В отличие от двухпроводной линии коаксиальная линия не имеет потерь на излучение, так как ее электромагнитное поле отделено от внешнего пространства надежным экраном – оболочкой внешнего цилиндрического проводника. Коаксиальный фидер обладает меньшими тепловыми потерями также оттого, что образующие его проводники имеют достаточно большие поверхности.

На сантиметровых волнах в качестве фидера используется волновод, представляющий собой полую металлическую трубу, в которой распространяются электромагнитные волны. Отсутствие в волноводе внутреннего проводника уменьшает расход энергии на нагревание и, следовательно, потери энергии сигнала при передаче.

Для анализа процессов, происходящих в длинных линиях, их представляют состоящими из элементарных участков. Эквивалентная схема участка линии длиной  $dx$  представлена на рисунке 2.2.

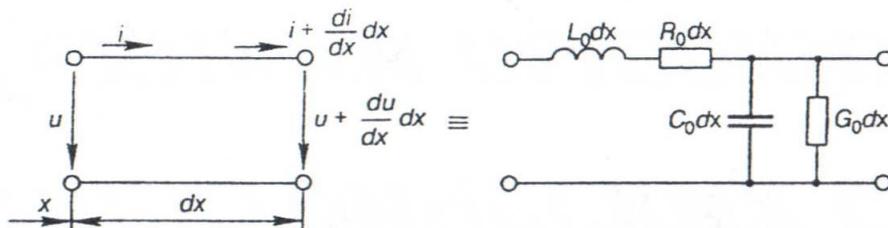


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема участка линии длиной  $dx$

На эквивалентной схеме рисунок 4.2 обозначены так называемые первичные параметры длинной линии  $L_0$  [Гн/км],  $R_0$  [Ом/км],  $C_0$  [Ф/км],  $G_0$  [См/км] (они еще называются погонными или километрическими). Значения первичных параметров, как правило, гостированы и, например, для двухпроводной линии обычно составляют следующие величины:  $L_0$  – единицы мГн/км,  $R_0$  – сотни Ом/км,  $C_0$  – десятки нФ/км,  $G_0$  – сотые доли мкСм/км. Зная величину километрических параметров, легко найти параметры линии передачи сигнала, если известна ее длина. Значение первичных параметров зависит от частоты сигнала.

Качественные типовые зависимости первичных параметров линии от частоты приведены на рисунке 2.3.

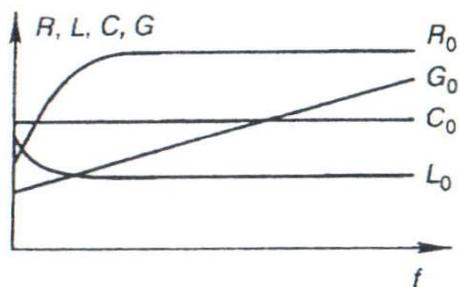


Рисунок 4.3 – Качественные типовые зависимости первичных параметров линии от частоты

Сильнее всех от частоты зависят резистивные параметры линии ( $R_0$ ,  $G_0$ ). что объясняется ростом потерь энергии сигнала от частоты при его распространении по линии. Потери связаны с поверхностным эффектом (скин-эффектом) и потерями в диэлектрике.

Далее будем рассматривать однородные линии, у которых значение первичных параметров неизменны на всей длине.

#### Тема 4.2. Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии

Представление длинной линии в виде суммы элементарных участков (см. рисунок 4.2) позволяет найти распределение тока и напряжения вдоль линии. Используя законы Кирхгофа, можно записать уравнения для напряжения и тока для элементарного участка, считая его обычной электрической цепью с сосредоточенными параметрами:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Это так называемые телеграфные уравнения длинной линии, определяющие изменения тока и напряжения вдоль линии. Они являются дифференциальными уравнениями в частных производных для мгновенных значений тока  $i(x, t)$  и напряжения  $u(x, t)$ .

Для режима гармонических колебаний, когда на входе линии действует источник гармонического сигнала, телеграфные уравнения (4.1) в символической форме записи будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0) \underline{I}; \\ -\frac{dI}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0) \underline{U}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Эти уравнения определяют распределение комплексных значений напряжения и тока вдоль линии. Они являются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Поэтому решение телеграфных уравнений в символической форме находится просто и имеет в общем случае следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}, \\ \underline{I} &= \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_B} e^{-\underline{\gamma}x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_B} e^{\underline{\gamma}x}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

В полученных решениях введены обозначения

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \\ \underline{Z}_B &= \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Как видно, в выражении (4.3) установившиеся напряжение и ток в произвольном сечении  $x$  состоят из суммы двух одинаковых по форме составляющих, отличающихся знаком в показателе экспоненты.

Введенные обозначения определяют вторичные параметры линии, причем  $\underline{\gamma}$  является коэффициентом распространения, а  $\underline{Z}_B$  – волновым сопротивлением линии. Используя алгебраическую форму записи, получим

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (4.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ослабления (потерь), дБ/км;

$\beta$  – коэффициент фазы, рад/км.

Их типовые значения  $\alpha=0,1 \dots 5$  дБ/км,  $\beta = -5 \cdot 10^{-6} \omega$  рад/км.

Используя показательную форму записи волнового сопротивления, находим

$$\underline{Z}_B = Z e^{j\varphi} \quad (4.7)$$

где  $Z$  – модуль волнового сопротивления, Ом,  
 $\varphi$  – его аргумент, рад.

Типовые значения этих параметров  $Z=600 \dots 1500$  Ом,  $\varphi=0 \dots 0,5$  рад.

Частотные зависимости вторичных параметров приведены на рисунке 4.4.

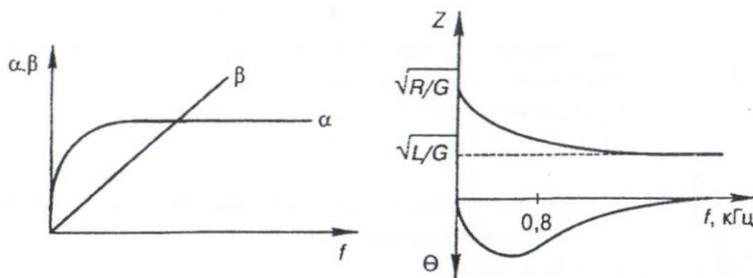


Рисунок 4.4 – Частотные зависимости вторичных параметров

Характер кривых на рисунке 4.4 определяется зависимостью первичных параметров линии от частоты (см. рис. 4.3). Действительно, вторичные параметры линии связаны с первичными следующими примерными зависимостями:

$$\alpha \approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{G_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad \beta \approx \omega \sqrt{L_0 C_0}. \quad (4.8)$$

Физический смысл вторичных параметров заключается в следующем: волновое сопротивление характеризует отношение комплексного напряжения к комплексному току волны, а коэффициент распространения характеризует изменение мощности волны, при прохождении ею единицы длины линии.

### Тема 4.3. Падающая и отраженная волны в линии

Напряжение и ток в любой точке линии можно рассматривать как результат наложения двух волн: падающей и отраженной, как это следует из выражения (4.3). Если знак в показателе экспоненты отрицательный, то увеличение  $x$  означает движение волны от начала линии ( $x=0$ ) к концу ( $x=l$ ). Если знак в показателе экспоненты положительный, то волна движется от конца к началу линии. Таким образом, падающая волна распространяется от источника к нагрузке. Обозначая напряжение падающей волны символом «+», находим

$$\underline{U}^+ = \underline{A}_1 e^{-\gamma x}, \quad u^+ = \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \psi_1) \quad (4.9)$$

Отраженная волна распространяется от нагрузки к источнику:

$$\underline{U}^- = \underline{A}_2 e^{\gamma x}, \quad u^- = \sqrt{2} A_2 e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \psi_2) \quad (4.10)$$

Распространение волн можно проследить, отслеживая координаты точек равной фазы, как показано на рисунке 2.5 для двух моментов времени.

При фиксированном расстоянии  $x$  каждая волна является гармонической функцией времени (см. (4.9) и (4.10)). Направление распространения волн показано на рисунке 4.5 стрелками. Амплитуда напряжения уменьшается по мере распространения волны. Степень уменьшения определяется коэффициентом ослабления  $\alpha$ .

Распространение волн можно проследить, отслеживая координаты точек равной фазы, как показано на рисунке 4.5 для двух моментов времени.

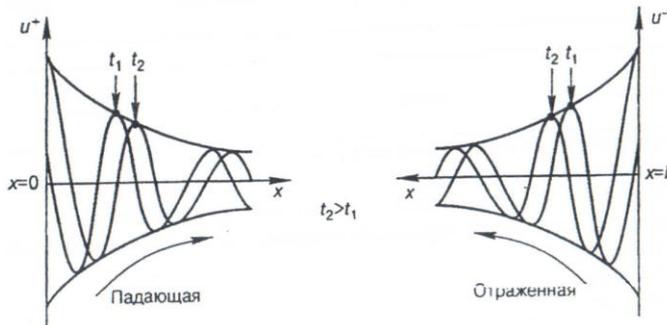


Рисунок 4.5 – Распространение волн для двух моментов времени

Фазовая скорость распространения – скорость перемещения точек колебаний равной фазы – определяется из выражения (4.9), если взять производную от полной фазы (аргумент «cos»), считая ее постоянной:

$$\omega dt - \beta dx = 0, \quad V_\phi = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.11)$$

Из выражения (4.11) следует, что фазовая скорость пропорциональна частоте сигнала. Однако коэффициент фазы также пропорционален частоте (см. (2.8)). Поэтому фазовая скорость практически не зависит от частоты сигнала, а определяется первичными параметрами линии.

#### Тема 4.4. Уравнение передачи длинной линии

Можно рассматривать линию как четырехполюсник, что представлено на рисунке 4.6.

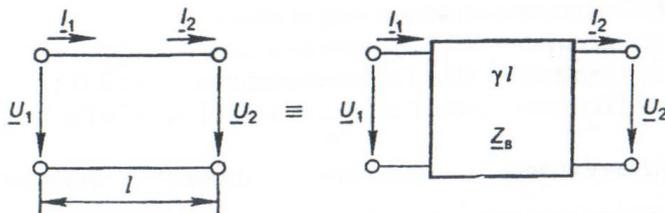


Рисунок 4.6 - Четырехполюсники

Рассмотрению линии как четырехполюсника соответствует переход  $\underline{\gamma}l$  и  $\underline{Z}_B$  в характеристические параметры четырехполюсника  $\underline{\Gamma}_C$  и  $\underline{Z}_C$ :

$$\underline{\gamma}l = \underline{\Gamma}_C; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_C. \quad (4.12)$$

Уравнение передачи длинной линии (2.3) можно представить в гиперболической, более компактной, форме, если определить постоянные интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  из граничных условий в начале и конце линии:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= ch\gamma l \underline{U}_2 + \underline{Z}_B sh\gamma l \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 &= \frac{sh\gamma l}{\underline{Z}_B} \underline{U}_2 + ch\gamma l \underline{I}_2. \end{aligned} \quad (4.13)$$

По форме эти уравнения соответствуют уравнениям передачи четырехполюсника в  $\underline{A}$ -параметрах.

Из теории четырехполюсников известно, что значения напряжения и тока зависят от степени его согласования по входу и выходу. Поэтому в нагруженной линии распределение напряжения и тока будет определяться не только волновыми параметрами, но и степенью согласования. Степень согласования длинной линии характеризуется коэффициентом отражения, который равен отношению комплексных амплитуд напряжений (или токов)

отраженной и падающей волн в произвольном сечении. Используя формулы (4.8) (4.9), найдем выражение для коэффициента отражения в произвольном сечении:

$$\underline{\mu}_u(x) = \frac{A_2}{A_1} e^{2\gamma x} \quad (4.14)$$

Используя граничные условия в конце линии  $x=l$ ,  $\underline{U}(l) = \underline{U}_2$ ,  $\underline{I}(l) = \underline{I}_2$ , можно из выражений (4.3) определить постоянные интегрирования и из формы (4.14) найти коэффициент отражения в следующем виде:

$$\underline{\mu}_u(x) = \frac{\underline{U}_2 - \underline{Z}_B \underline{I}_2}{\underline{U}_2 + \underline{Z}_B \underline{I}_2} e^{-2\gamma(l-x)} \quad (4.15)$$

В режиме согласованного включения  $\underline{Z}_Г = \underline{Z}_B = \underline{Z}_H$  в линии распространяется только падающая волна. Такой режим называется режимом бегущей волны и является предпочтительным, поскольку вся энергия падающей волны остается в нагрузке. В этом случае коэффициент отражения будет равен нулю. Этот вывод можно получить из выражения (4.15), если подставить очевидное соотношение  $\underline{U}_2 = \underline{Z}_H \underline{I}_2$  и воспользоваться условием согласованного включения. Входное сопротивление линии в режиме бегущих волн равно волновому сопротивлению. Если линия имеет потери, то амплитуды тока и напряжения в этом режиме убывают по экспоненциальному закону с увеличением расстояния  $x$ . Поэтому для лучшей передачи энергии сигнала нужно брать линию как можно короче. Если линия без потерь, то величины тока и напряжения от расстояния не зависят.

В случае режима бегущей волны уравнения передачи (4.13) упрощаются и имеют следующий вид:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^{\gamma l} \quad (4.16)$$

При наличии рассогласования на входе и выходе в линии образуются потоки падающих и отраженных волн, как условно показано на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Потоки падающих и отраженных волн

На этом рисунке по оси абсцисс показано расстояние от начала линии  $x=0$  к ее концу  $x=l$ . По оси ординат откладывается амплитуда напряжения волн. Условно на рисунке 4.7 считается, что после второго переотражения волн их амплитуда равна нулю, хотя на самом деле амплитуда убывает по экспоненте (см. (4.9) и (4.10)).

Наличие отражений искажает передаваемый сигнал, поэтому на практике коэффициенты отражений на входе и выходе реальных линий строго нормируют. Значения этих коэффициентов определяется в соответствии с формулами (4.15):

$$\underline{\mu}(0) = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B} e^{-2\gamma l}, \quad \underline{\mu}(l) = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B} \quad (4.17)$$

Таким образом, модуль коэффициента отражения растет по мере увеличения  $x$  и достигает наибольшего значения в конце линии.

#### Тема 4.5. Линия без потерь

Линией без потерь называют линию, в которой можно пренебречь рассеянием энергии. В этом случае резистивные первичные параметры будут равны нулю, т.е.  $R_0 \approx 0$ ,  $G_0 \approx 0$ . Тогда вторичные параметры будут определяться следующими соотношениями:

$$\alpha = 0; \quad \beta = \omega\sqrt{L_0 C_0} = 2\pi/\lambda; \quad Z_B = \sqrt{L_0/C_0}. \quad (4.18)$$

В этом случае уравнения передачи для линии без потерь (2.13) для произвольного сечения линии с учетом  $ch(\underline{\gamma}y) = ch(j\beta y) = \cos(\beta y)$  и  $sh(\underline{\gamma}y) = sh(j\beta y) = j \sin(\beta y)$  принимают вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}(y) &= \underline{U}_2 \cos(\beta y) + jZ_B \underline{I}_2 \sin(\beta y); \\ \underline{I}(y) &= \underline{I}_2 \cos(\beta y) + j \frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin(\beta y). \end{aligned} \quad (4.19)$$

где  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{I}_2$  – комплексные значения напряжения и тока в конце линии (т.е. в нагрузке);

$\underline{U}(y)$ ,  $\underline{I}(y)$  – комплексные значения напряжения и тока на расстоянии  $y = x - l$  от конца линии.

Входное сопротивление линии без потерь

$$\underline{Z}_{BX}(y) = Z_B \frac{\underline{Z}_H \cos(\beta y) + jZ_B \sin(\beta y)}{Z_B \cos(\beta y) + j\underline{Z}_H \sin(\beta y)} = Z_B \frac{\underline{Z}_H + jZ_B \operatorname{tg}(\beta y)}{Z_B + j\underline{Z}_H \operatorname{tg}(\beta y)}$$

С учетом (2.18)  $\beta = 2\pi/\lambda$  окончательно находим

$$\underline{Z}_{BX}(y) = Z_B \frac{\underline{Z}_H + jZ_B \operatorname{tg}(2\pi y/\lambda)}{Z_B + j\underline{Z}_H \operatorname{tg}(2\pi y/\lambda)} \quad (4.20)$$

В зависимости от типа нагрузки  $\underline{Z}_H$  на конце линии различают следующие режимы работы:

- линия с разомкнутыми выходными зажимами ( $\underline{Z}_H = \infty$ ),
- линия с разомкнутыми накоротко выходными зажимами ( $\underline{Z}_H = 0$ ),
- подключение к линии реактивной нагрузки ( $\underline{Z}_H = \pm jX_H$ ),
- подключение к линии согласованной нагрузки ( $\underline{Z}_H = Z_B$ ),
- подключение к линии несогласованной нагрузки ( $\underline{Z}_H \neq Z_B$ ).

Рассмотрим распределение напряжения и тока вдоль линии при различных режимах работы. Используя выражение для коэффициента отражения в конце линии (4.17) из формулы (4.15) можно определить его модуль для произвольного сечения в общем случае:

$$\mu(x) = \left| \underline{\mu}(x) \right| = \mu(l) e^{-2\alpha(l-x)} \quad (4.21)$$

Для первых трех случаев значений нагрузки модуль коэффициента отражения в конце линии будет равен единице, поскольку в линии отсутствуют потери, а для этих случаев  $\mu(l) = 1$ . Тогда амплитуды отраженной и падающей волн будут одинаковы, и в линии возникнет так называемый режим стоячих волн. Таким образом, режим стоячих волн может возникнуть только в линии без потерь при холостом ходе, коротком замыкании и реактивной нагрузке.

Рассмотрим режим стоячих волн более подробно.

В режиме холостого хода, т.е. когда линия на конце разомкнута ( $\underline{Z}_H = \infty$ ),  $\underline{I}_2 = 0$ , из уравнений (4.19) имеем

$$\begin{aligned} \underline{U}_{XX}(y) &= \underline{U}_2 \cos(2\pi y/\lambda), \\ \underline{I}_{XX}(y) &= j \frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin(2\pi y/\lambda) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Если начальную фазу напряжения  $\underline{U}_2$  принять равной нулю ( $\underline{U}_2 = U_2, \psi_{u_2} = 0$ ), тогда мгновенные значения напряжения и тока будут:

$$\begin{aligned} u_{xx}(y, t) &= \left| U_2 \sqrt{2} \cos(2\pi y / \lambda) \right| \cos(\omega t); \\ i_{xx}(y, t) &= \left| \frac{U_2 \sqrt{2}}{Z_B} \sin(2\pi y / \lambda) \right| \cos(\omega t + 90^\circ). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Действующие значения напряжения и тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных и соответственно определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{xx}(y) &= \left| U_2 \cos(2\pi y / \lambda) \right|, \\ \underline{I}_{xx}(y) &= \left| \frac{U_2}{Z_B} \sin(2\pi y / \lambda) \right|. \end{aligned} \quad (4.24)$$

В эти выражения переменная времени не входит, следовательно, распределение действующих значений напряжения и тока вдоль линии с течением времени не меняется. Рассмотренный режим колебаний называют режимом стоячих волн.

На рисунке 4.8 а и б показаны распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии. В линии имеются точки, где амплитуда колебаний равна нулю (узлы напряжения или тока), и точки, где амплитуда колебаний максимальна (пучности напряжения или тока). Стоячие волны являются результатом сложения падающей и отраженной волн с равными амплитудами. В пучностях фазы обеих волн совпадают и амплитуда суммарной волны вдвое больше амплитуды падающей волны, а в узлах фазы противоположны и амплитуда суммарной волны равна нулю.

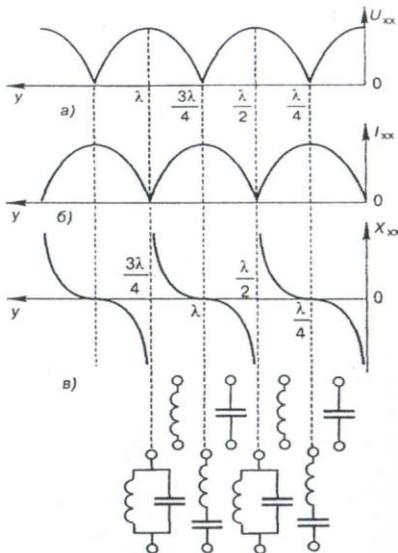


Рисунок 4.8 - Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии

Входное сопротивление разомкнутой линии (в режиме холостого хода) на расстоянии  $y$  определяется из выражения (4.20):

$$\underline{Z}_{BX(CX)}(y) = \frac{U_2 \cos(2\pi y / \lambda)}{j(U_2 / Z_B) \sin(2\pi y / \lambda)} = -jZ_B \operatorname{ctg}(2\pi y / \lambda) = jX_{BX(CX)}(y) \quad (4.25)$$

Таким образом, входное сопротивление линии в таком режиме будет реактивным. График зависимости  $X_{BX(CX)}(y)$  представлен на рис. 4.8,в. Разомкнутая на конце линия длиной от 0 до  $\lambda/4$  имеет входное сопротивление емкостного характера ( $X_{BX(CX)} < 0$ ). Линия длиной  $l = \lambda/4$  имеет входное сопротивление равное 0, т.е. такой отрезок длинной линии

аналогичен последовательному колебательному контуру без потерь ( $X_{BX(XX)} = 0$ ). Линия длиной от  $\lambda/4$  до  $\lambda/2$  имеет входное сопротивление индуктивного характера ( $X_{BX(XX)} < 0$ ). Линия длиной  $l = \lambda/2$  имеет бесконечное входное сопротивление ( $X_{BX(XX)} = \infty$ ), т.е. такой отрезок длинной линии аналогичен параллельному колебательному контуру без потерь.

В режиме короткого замыкания, т.е. когда линия на конце замкнута ( $Z_B = 0$ ),  $U_2 = 0$ , получим уравнение передачи

$$\begin{aligned} \underline{U}_{K3}(y) &= jI_2 Z_B \sin(2\pi y/\lambda), \\ \underline{I}_{K3}(y) &= I_2 \cos(2\pi y/\lambda). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Входное сопротивление короткозамкнутой линии (в режиме короткого замыкания) на расстоянии  $y$  определяется из выражения (4.20) как:

$$\underline{Z}_{BX(K3)}(y) = jZ_B \operatorname{tg}(2\pi y/\lambda) \quad (4.27)$$

Если начальную фазу тока  $I_2$  принять равной нулю ( $I_2 = I_2$ ,  $\psi_{i_2} = 0$ ), тогда мгновенные значения напряжения и тока:

$$\begin{aligned} u_{K3}(y, t) &= |I_2 \sqrt{2} Z_2 \sin(2\pi y/\lambda)| \cos(\omega t + 90^\circ); \\ i_{K3}(y, t) &= |I_2 \sqrt{2} \cos(2\pi y/\lambda)| \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (4.28)$$

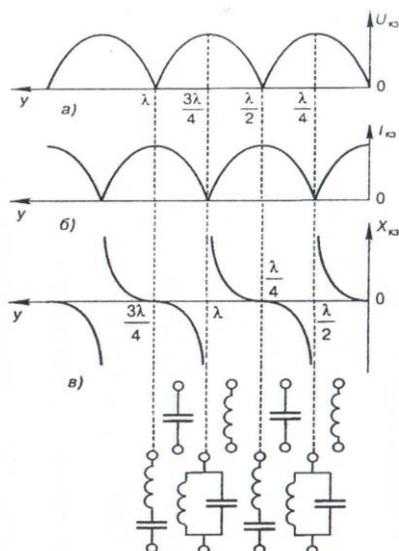


Рисунок 4.9 – Графики распределения амплитудных значений напряжения и тока, а также входного сопротивления вдоль линии

Графики распределения амплитудных значений напряжения и тока, а также входного сопротивления вдоль линии показаны на рисунке 4.9. В короткозамкнутой линии так же, как и в разомкнутой, имеет место режим стоячих волн.

Короткозамкнутая линия без потерь длиной  $l = \lambda/4$  имеет неограниченно большое входное сопротивление ( $X_{BX(K3)} = \infty$ ). Если в линии имеются потери, то входное сопротивление не бесконечно, но достаточно велико. Это свойство часто используется в различных схемах.

При нагрузке линии на реактивное сопротивление ( $Z_H = \pm jX_H$ ) образуются стоячие волны, как и в режимах холостого хода и короткого замыкания.

Реактивный элемент, подключаемый к линии в качестве нагрузки, можно заменить эквивалентным отрезком линии, входное сопротивление которого равно сопротивлению реактивного элемента. Емкостной элемент можно заменить разомкнутым отрезком линии

длиной  $l < \lambda/4$ , а индуктивный элемент – короткозамкнутым отрезком длиной  $l < \lambda/4$ . При этом, если нагрузка индуктивная, узлы и пучности сдвигаются влево, в сторону генератора, и вправо, в сторону нагрузки, если она емкостная (рисунок 4.10).

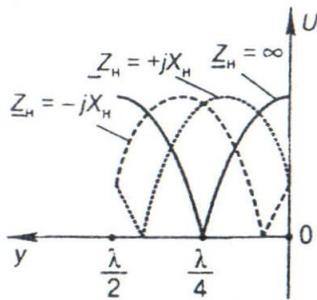


Рисунок 4.10 – График смещения узлов и пучности

Если линия нагружена на резистивное сопротивление, равное волновому ( $Z_H = R_H = Z_B$ ), то нагрузка является согласованной. В этом случае комплексные действующие значения напряжения и тока на выходных зажимах линии связаны соотношением

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 Z_H = \underline{I}_2 Z_B. \quad (4.29)$$

Напряжение и ток совпадают по фазе, так как в линии без потерь  $Z_B$  принимает действительное (не комплексное) значение. Коэффициент отражения  $\mu = 0$ , и в линии существует только падающая волна с неизменной амплитудой. Распределение параметров линии вдоль ее длины представлено на рисунке 4.11, где по оси ординат отложены соответствующие величины.

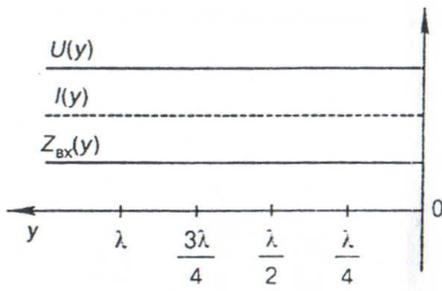


Рисунок. 4.11 – Распределение параметров линии вдоль ее длины

Если начальную фазу напряжения  $\underline{U}_2$  принять равной нулю ( $\underline{U}_2 = U_2$ ,  $\psi_{u_2} = 0$ ), то, используя формулу Эйлера, находим

$$\begin{aligned} \underline{U}(y) &= U_2 \cos(2\pi y/\lambda) + jU_2 \sin(2\pi y/\lambda) = U_2 e^{(j\beta y)} \\ \underline{I}(y) &= I_2 \cos(2\pi y/\lambda) + jI_2 \sin(2\pi y/\lambda) = I_2 e^{(j\beta y)} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Тогда мгновенные значения напряжения и тока в согласованном режиме определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{\text{cosл}}(y, t) &= |U_2 \sqrt{2}| \cos(\omega t + \beta y); \\ i_{\text{cosл}}(y, t) &= |I_2 \sqrt{2}| \cos(\omega t + \beta y). \end{aligned} \quad (4.31)$$

Входное сопротивление согласованной линии  $Z_{BX}(y) = \underline{U}(y)/\underline{I}(y) = R_H = Z_B$  – резистивное равно волновому сопротивлению и не зависит от длины линии.

При подключении несогласованной резистивной нагрузки ( $Z_H = R_H \neq Z_B$ ) действующие значения напряжения и тока на выходных зажимах линии связаны соотношением  $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 Z_H = \underline{I}_2 R_H$ , тогда

$$\begin{aligned} \underline{U}(y) &= \underline{U}_2 \left[ \cos(2\pi y/\lambda) + j \frac{Z_B}{R_H} \sin(2\pi y/\lambda) \right], \\ \underline{I}(y) &= \underline{I}_2 \left[ \cos(2\pi y/\lambda) + j \frac{R_H}{Z_B} \sin(2\pi y/\lambda) \right]. \end{aligned} \quad (4.32)$$

При этом коэффициент отражения  $|\mu| < 1$ .

Распределение амплитуд напряжения вдоль линии при соотношении  $R_H < Z_B$  приведены на рисунке 4.12. В линии одновременно присутствуют как бегущие, так и стоячие волны. Такой режим называется режимом смешанных волн. В этом режиме энергия волны частично поглощается нагрузкой, а частично отражается к источнику сигнала, т.е. ко входу линии. На рисунке 4.12 составляющая бегущей волны изображена горизонтальной линией, ордината которой определяет напряжение в нагрузке.



Рисунок 4.12 – Распределение амплитуд напряжения вдоль линии при соотношении  $R_H < Z_B$

Чем больше отличие между сопротивлением нагрузки  $R_H$  и волновым сопротивлением  $Z_B$ , тем больше отличие между максимальным и минимальным значениями напряжения  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$ . Минимальное значение напряжения определяет уровень бегущей волны. Для количественной оценки отличия напряжений в минимуме и максимуме, т.е. степени рассогласования линии с нагрузкой, служит коэффициент бегущей волны

$$K_{бв} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{1-|\mu|}{1+|\mu|} \quad (4.33)$$

Он характеризует величину бегущей волны и изменяется от нуля до единицы. Режим бегущей волны (желательный режим для линий передачи сигнала) будет при  $K_{бв}=1$ , а при  $K_{бв}=0$  будет режим стоячих волн.

Иногда используют понятие коэффициента стоячей волны

$$K_{св} = 1/K_{бв} \quad (4.34)$$

Очевидно,  $K_{св}$  может изменяться от единицы до бесконечности.

#### Тема 4.6. Принципы использования отрезков длинных линий без потерь

В реальных линиях часть полезной мощности теряется в виде тепловых потерь. Чтобы передача энергии осуществлялась с наименьшими потерями, фидер должен работать в режиме бегущих волн. Кроме того, наличие отраженной волны приводит к неравномерному распределению действующих значений напряжения вдоль линии и, следовательно, увеличивает потери на излучение и опасность электрического пробоя линии в точках, где действующие значения напряжения достигают наибольших значений.

Для того чтобы фидер работал в режиме бегущих волн, его нагрузочное сопротивление должно быть равно волновому.

Рассмотрим согласование линии с нагрузочным сопротивлением, не равным волновому,

с помощью четвертьволнового трансформатора. Схема такого согласования приведена на рисунке 4.13.

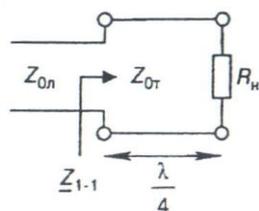


Рисунок 4.13 – Схема согласования линии с нагрузочным сопротивлением

Пусть волновое сопротивление линии равно  $Z_{0л}$ , а сопротивление нагрузки резистивное, причем  $Z_H = R_H \neq Z_{0л}$ . Расчет четвертьволнового трансформатора сводится к определению его волнового сопротивления  $Z_{0т}$ , которое должно быть выбрано так, чтобы входное сопротивление трансформирующего отрезка с нагрузкой  $R_H$  было бы равно волновому сопротивлению линии:  $Z_{1-1} = Z_{0л}$ . Подставим в формулу (4.20)  $l = \lambda/4$ . В результате находим

$$Z_{1-1} = Z_{0т} \frac{R_H + jZ_{0т} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right)}{Z_{0т} + jR_H \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right)} = \frac{Z_{0т}^2}{R_H} = Z_{0л} \quad (4.35)$$

откуда получим

$$Z_{0т} = \sqrt{R_H Z_{0л}} \quad (4.36)$$

Необходимая величина  $Z_{0т}$  для линии подбирается изменением расстояния между проводниками. Таким образом, четвертьволновый согласующий трансформатор позволяет устранить отраженную волну в основной части линии при произвольной нагрузке. Однако на практике рассмотренный способ согласования иногда применять нецелесообразно, так как в конструктивном отношении неудобно иметь согласующие трансформаторы с очень большими или, наоборот, очень малыми, волновыми сопротивлениями.

## Раздел 5. Четырехполюсники

### Тема 5.1. Уравнения передачи четырехполюсников

Четырехполюсником называют электрическую цепь произвольной топологии, имеющую две пары зажимов (полюсов) для подключения к источнику (генератору) сигнала и нагрузке. Первая пара зажимов считается входной, а вторая — выходной. Любую физическую цепь, включенную между источником и приемником сигнала, можно рассматривать как четырехполюсник, который условно изображают в виде прямоугольника, как показано на рис. 5.1.

Пусть на входе четырехполюсника, т.е. на зажимах 1-1', действует источник гармонического напряжения  $\underline{U}_r$ , имеющий внутреннее комплексное сопротивление  $\underline{Z}_r$ , а на выходе (зажимы 2-2') подключена нагрузка  $\underline{Z}_H$  (см. рис. 5.1). При таком включении четырехполюсник будет работать в гармоническом режиме, и для его анализа можно использовать символический метод. Тогда на его входе будет действовать комплексное напряжение  $\underline{U}_1$ , а на выходе напряжение  $\underline{U}_2$ . Через входные зажимы четырехполюсника будет протекать комплексный ток  $I_1$ , а через выходные — ток  $I_2$ .

Далее будем рассматривать линейные четырехполюсники, которые создают токи и напряжения на выходных зажимах лишь при действии источника входного сигнала.

Уравнения, связывающие между собой комплексные напряжения и токи на входных и выходных зажимах четырехполюсника, называют уравнениями передачи. Поскольку эти

уравнения устанавливают соотношения между четырьмя величинами (токи и напряжения на входе и выходе), всего можно составить шесть уравнений передачи (число сочетаний из четырех по два).

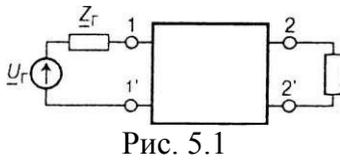


Рис. 5.1

При воздействии комплексных токов  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$ , используя принцип наложения (суперпозиции), который справедлив для линейных электрических цепей, можно записать уравнения передачи для комплексных напряжений  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$ , являющихся реакцией четырехполюсника на эти воздействия, в виде

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \underline{I}_2; \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{22} \underline{I}_2. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Уравнения (5.1) связывают напряжения и токи. Размерные коэффициенты в правой части уравнений (5.1) отражают вклад воздействий источников тока на напряжения четырехполюсника и называются параметрами четырехполюсников, или  $Z$ -параметрами.

Различают еще пять форм уравнений передачи в системах  $\underline{Y}$ -,  $\underline{H}$ -,  $\underline{F}$ -,  $\underline{A}$ - и  $\underline{B}$ -параметров.

Уравнения, которые устанавливают связь между воздействием напряжений и реакцией четырехполюсника в виде токов, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{12} \underline{U}_2; \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Эти уравнения имеют коэффициенты в виде комплексных проводимостей или  $\underline{Y}$ -параметров.

Остальные виды уравнений передачи приведены в матричной форме записи уравнений:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{B}_{11} & \underline{B}_{12} \\ \underline{B}_{21} & \underline{B}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{F}_{11} & \underline{F}_{12} \\ \underline{F}_{21} & \underline{F}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Все эти уравнения передачи равноправны, однако уравнения в  $\underline{A}$ -параметрах называют основными, или обобщенными, поскольку они связывают параметры входа и выхода четырехполюсника.

Из уравнений легко получить размерность коэффициентов, имея в виду, что размерности левой и правой частей уравнений должны совпадать. Например, для первого уравнения передачи с

$\underline{A}$ -параметрами  $\underline{U}_1 = \underline{A}_{11} \underline{U}_2 + \underline{A}_{12} \underline{I}_2$  размерность левой части — вольты, тогда, чтобы получить такую же размерность правой части уравнения, параметр  $\underline{A}_{11}$  должен быть безразмерным, а размерность параметра  $\underline{A}_{12}$  должна быть омы, поскольку  $[V] = [Om] \cdot [A]$ . Аналогично находятся размерности других параметров.

## Тема 5.2. Параметры четырехполюсников

Коэффициенты уравнений передачи называются внутренними, или собственными параметрами четырехполюсника, поскольку характеризуют собственно четырехполюсник, независимо от внешних цепей, между которыми он может быть включен. Так как различные параметры характеризуют один и тот же четырехполюсник, они однозначно связаны друг с другом, т.е., зная одну систему параметров, всегда можно найти все остальные. Опытным путем значения параметров находят из двух режимов работы четырехполюсника: режима холостого хода (зажимы разомкнуты) по входу или по выходу и режима короткого замыкания (зажимы замкнуты) по входу или по выходу (всего четыре схемы включения). Выбирают две схемы включения в зависимости от того, какие параметры надо найти. Например, на рис. 5.2 показаны структурные схемы включения четырехполюсника в режиме короткого замыкания по выходу и по входу для определения  $\underline{Y}$ -параметров.

Очевидно, для этих схем включения напряжение на выходе и входе четырехполюсника будет равно нулю, так как сопротивление короткого замыкания равно нулю и в соответствии с законом Ома произведение тока на нулевое сопротивление будет равно нулю. В этом случае для уравнений передачи с  $\underline{Y}$ -параметрами (5.2) получим следующие значения этих параметров:

$$\underline{Y}_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2 = 0}; \underline{Y}_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1 = 0}; \underline{Y}_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2 = 0}; \underline{Y}_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1 = 0}. \quad (5.4)$$

На рис. 5.3 показаны структурные схемы включения четырехполюсника в режиме холостого хода по выходу и по входу для определения  $\underline{Z}$ -параметров. Для этих схем включения ток на выходе и входе четырехполюсника будет равен нулю, так как сопротивление холостого хода равно бесконечности и в соответствии с законом Ома результат деления напряжения на бесконечное сопротивление будет равен нулю. В этом случае для уравнений передачи с  $\underline{Z}$ -параметрами (5.1) получим

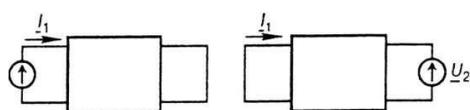


Рис. 5.2

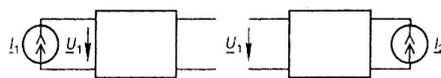


Рис. 5.3

следующие значения этих параметров.

$$\underline{Z}_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2 = 0}; \underline{Z}_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_2 = 0}; \underline{Z}_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2 = 0}; \underline{Z}_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1 = 0}. \quad (5.5)$$

Можно заметить, что выбор схем включения четырехполюсника для определения параметров определяется формой уравнения передачи четырехполюсника. Действительно, схемы должны соответствовать нулевым значениям переменных правой части уравнений передачи (обнулять вектор в правой части матричной формы уравнений (5.3)). Например, для определения

$$\begin{matrix} 2 - = \pm 4 - \\ 1, -0 \quad 12 \sim \sim \Gamma \end{matrix}$$

$\underline{A}$ -параметров необходимо, чтобы две схемы из четырех (рис. 5.2 и 5.3) давали  $\underline{U}_2 = 0$ ,  $\underline{I}_2 = 0$ . Очевидно, это будут схемы короткого замыкания по выходу и холостого хода по выходу.

Для обобщенных параметров справедливо соотношение  $\underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \underline{A}_{21} = 1$ , т.е. лишь три из этих параметров независимы. Уравнения связи различных параметров можно найти путем преобразования одной системы уравнений передачи в другую. Тогда коэффициенты правой части преобразованных уравнений будут определять эту связь. Например, известны  $\underline{Z}$ -параметры, требуется определить  $\underline{H}$ -параметры. Преобразуем систему уравнений (5.1) к виду системы уравнений с  $\underline{H}$ - параметрами (5.3). Подставляя из второго уравнения (5.1) в первое уравнение значение  $\underline{I}_2$ , находим

$$\underline{U}_1 = \left( Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22}} \right) I_1 + \frac{Z_{12}}{Z_{22}} U_2.$$

Далее из второго уравнения получим

$$I_2 = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} I_1 + \frac{1}{Z_{22}} U_2$$

Сравнивая эти уравнения с системой уравнений с  $\underline{H}$ -параметрами, определяем уравнение связи:

$$\left( Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22}} \right) = \underline{H}_{12}; \quad \frac{Z_{12}}{Z_{22}} = \underline{H}_{11}; \quad -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} = \underline{H}_{21}; \quad \frac{1}{Z_{22}} = \underline{H}_{22}.$$

Структура четырехполюсника накладывает ограничения на его параметры:

- $\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{22}$  у симметричных четырехполюсников (одинаковых со стороны входа и выхода);
- $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$  у пассивных четырехполюсников (не содержащих зависимых источников).

В качестве примера решения тестовых заданий на определение внутренних параметров четырехполюсника рассмотрим задачу определения Л-параметров простейшего

В соответствии с методом контурных токов запишем уравнения для двух контуров, отмеченных на схеме:

$$I_1(\underline{Z}_{1\bar{A}} + \underline{Z}_{2\bar{A}}) - I_2 \underline{Z}_{2\bar{A}} = U_1;$$

$$I_2 \underline{Z}_{2\bar{A}} - I_1 \underline{Z}_{2\bar{A}} = -U_2$$

Представим эту систему уравнений в стандартной для  $\underline{A}$ -параметров форме:

$$\underline{U}_1 = \left( 1 + \frac{\underline{Z}_{1\bar{A}}}{\underline{Z}_{2\bar{A}}} \right) U_2 + \underline{Z}_{1\bar{A}} I_2;$$

$$\underline{I}_1 = \left( \frac{1}{\underline{Z}_{2\bar{A}}} \right) \underline{U}_2 + \underline{I}_2$$

Отсюда следует значение матрицы Л-параметров (см. формулы (5.3)):

$$(\underline{A}) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\underline{Z}_{1\bar{A}}}{\underline{Z}_{2\bar{A}}} & \underline{Z}_{1\bar{A}} \\ \frac{1}{\underline{Z}_{2\bar{A}}} & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

На основании этого результата можно определять  $\underline{A}$ -параметры других типов четырехполюсников. Например, пусть задан простейший четырехполюсник, показанный на рис. 5.5. Очевидно, у этого четырехполюсника  $\underline{Z}_{1\Gamma} = 0$ ,  $\underline{Z}_{2\Gamma} = \infty$ . Подставляя эти значения в найденное выражение для матрицы  $\underline{A}$ -параметров, получим

$$(\underline{A}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Эту задачу можно решить иначе, не используя полученное выражение для матрицы  $\underline{A}$ -параметров  $\Gamma$ -образного четырехполюсника (5.3), а используя уравнения передачи с  $\underline{A}$ -параметрами для схемы четырехполюсника. Действительно, из схемы следует, что  $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ ,  $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$ . Тогда в первом уравнении передачи с  $\underline{A}$ -параметрами (5.3) должно быть  $\underline{A}_{11} = 1$ , а  $\underline{A}_{12} = 0$ . Во втором уравнении передачи должно быть  $\underline{A}_{21} = 0$ , а  $\underline{A}_{22} = 1$ . Только при этих условиях будут выполняться соотношения между токами и напряжениями.

Можно и по другому найти  $\underline{A}$ -параметры для этой схемы, используя рассмотренные выше схемы короткого замыкания и холостого хода. Действительно, используя схему короткого замыкания по выходу, получим  $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = 0$ ,  $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$ , тогда из первого уравнения находим  $\underline{A}_{12} = 0$ , а из второго  $\underline{A}_{22} = 1$ . Используя схему холостого хода по выходу, находим  $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = 0$ ,  $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ . Тогда из первого уравнения получим  $\underline{A}_{11} = 1$ , а из второго  $\underline{A}_{21} = 0$ .

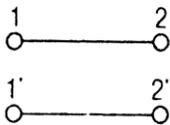


Рис. 5.5

### Тема 5.3. Схемы замещения четырехполюсников

Два четырехполюсника эквивалентны (взаимозамещаемы), если описываются одинаковыми уравнениями передачи. Для любого четырехполюсника, используя уравнения передачи, можно строить различные топологические модели (схемы замещения).

Схемы замещения пассивных (не содержащих управляемые источники) четырехполюсников строятся исходя из условия  $\underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{12}$ . Наиболее часто используются  $\Gamma$ -образные (см. рис. 5.4),  $\Pi$ -образные и  $T$ -образные схемы (рис. 5.6). Такое название схем следует из их внешнего сходства с соответствующими прописными буквами.

Схемы замещения имеют простейшую структуру и позволяют упростить анализ сложных электрических цепей. На рис. 5.6 показаны параметры эквивалентных схем замещения.  $\Pi$ -образная схема замещения имеет  $\underline{Y}$ -параметры, соответствующие уравнениям передачи (5.2), а  $T$ -образная схема имеет  $\underline{Z}$ -параметры соответствующих уравнений (5.1).

Это соответствие легко проверить, используя метод узловых потенциалов для расчета П-образной схемы и метод контурных токов для Т-образной схемы.

Схемы замещения активных, т.е. содержащих управляемые источники, четырехполюсников часто строятся на основе  $\underline{Y}$ -,  $\underline{F}$ - или  $\underline{H}$ - параметров. Например, если рассматривать уравнения передачи с  $\underline{Y}$ -параметрами (5.2), то левую часть можно представить двумя источниками тока, управляемыми напряжением (зависимые источники типа ИТУН). Соответствующая схема замещения будет иметь вид, показанный на рис. 5.7,а. Для уравнений передачи с  $\underline{H}$ -параметрами (5.3) левая часть соответствует источнику напряжения, управляемому напряжением (зависимый источник типа ИНУН), и источнику тока, управляемому напряжением (зависимый источник типа ИТУН). Эта схема замещения приведена на рис. 5.7,б.

Используя эти схемы, можно получить соответствующие матрицы параметров идеальных зависимых источников. Например, для ИТУН, используя схему рис. 5.7,а, находим, что при условии  $\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{22} = 0$  схема преобразуется в ИТУН с коэффициентом управления  $\underline{Y}_{21}$ . Таким образом, матрица  $\underline{Y}$ -параметров при таких условиях имеет вид

$$(\underline{Y}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \underline{Y}_{21} & 0 \end{pmatrix}$$

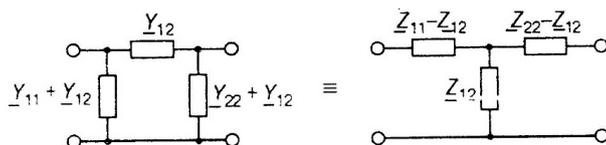


Рис. 5.6

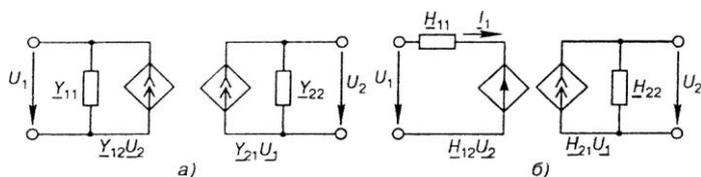


Рис. 5.7

Используя уравнения связи, можно найти матрицы других параметров для ИТУН, если это необходимо. Аналогичным методом находят матрицы параметров для других зависимых источников.

#### Тема 5.4. Характеристические параметры четырехполюсника

Волновая теория (теория характеристических параметров) базируется на представлении четырехполюсника в виде некоторой передающей среды, которая по отношению к приходящему сигналу играет тройную роль:

- отражает (на входе и выходе);
- пропускает с ослаблением;
- сдвигает во времени (задерживает).

При передаче сигналов от источника к приемнику может использоваться несколько четырехполюсников. Наиболее желательным является режим согласованного включения

этих четырехполюсников. Расчет согласованного режима может основываться на понятии характеристических параметров.

Два сопротивления  $Z_{c1}$  и  $Z_{c2}$  называются характеристическими, если они удовлетворяют условиям:

- входное сопротивление четырехполюсника, нагруженного по выходу на  $Z_{c2}$ , равно  $Z_{c1}$ ;
- выходное сопротивление четырехполюсника, нагруженного по входу на  $Z_{c1}$ , равно  $Z_{c2}$

На рис. 5.8 показаны схемы выполнения этих условий.

Таким образом, для передачи сигнала с минимальными потерями необходимо выполнять два условия согласования: одно по входу и одно по выходу. Тогда режимом согласованного включения называют такой режим работы четырехполюсника, когда сопротивление источника со-

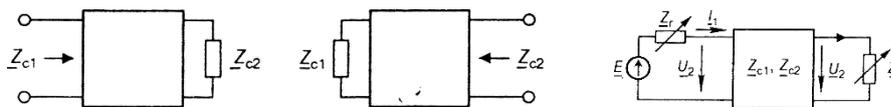


Рис. 5.8

впадает с  $Z_{c1}$ , а со-

противление нагрузки — с  $Z_{c2}$ . На рис. 5.9 проиллюстрировано это свойство характеристических сопротивлений.

Характеристические сопротивления являются собственными параметрами четырехполюсника, поэтому на рис. 5.9 они обозначены внутри прямоугольника, обозначающего четырехполюсник, причем индекс 1 указывает на сопротивление со стороны входных зажимов, а индекс 2 — со стороны выходных. Сопротивления генератора и нагрузки показаны переменными, поскольку, изменяя эти сопротивления, можно добиться режима согласованного включения четырехполюсника. Этот режим наступает, когда выполнены два условия:  $Z_r = Z_{c1}$  и  $Z_n = Z_{c2}$ .

Если характеристические сопротивления вещественные, то режим согласованного включения означает передачу максимума полной мощности от источника в нагрузку через четырехполюсник.

При согласованном включении потери энергии сигнала будут происходить только в четырехполюснике, если он содержит резистивные элементы. Для учета этих потерь вводят понятие собственной, или характеристической, постоянной передачи четырехполюсника. Характеристической (собственной) постоянной передачи  $\underline{\Gamma}$  четырехполюсника называют половину натурального логарифма отношения произведения комплексных напряжения и тока на входе к произведению комплексных напряжения и тока на его выходе в режиме согласованного включения:

$$\frac{\underline{U}_1 \underline{I}_1}{\underline{U}_2 \underline{I}_2} = e^{2\bar{\Gamma}} \quad (5.7)$$

Для симметричных четырехполюсников, для которых выполняется условие  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ , в условиях согласованного включения отношения напряжений (токов) на входе и выходе четырехполюсника определяются только одним параметром  $\underline{\Gamma}$ , т.е.

$$\underline{U}_1 / \underline{U}_2 = \underline{I}_1 / \underline{I}_2 = e^{\underline{A}}$$

Физическое представление собственной передачи четырехполюсника раскрывается, если представить ее в алгебраической форме записи:  $\underline{\Gamma} = A_c + jB_c$ , тогда  $A_c$  - характеристическое ослабление (действительная часть комплексной величины), а  $B_c$  — характеристическая фаза (мнимая часть комплексной величины).

Параметр  $A_c$  показывает ослабление полной мощности сигнала при передаче через согласованно включенный четырехполюсник и описывается соотношением, следующим из формулы (5.7), если представить входящие в нее комплексные величины в показательной форме записи:

$$A_c = \frac{1}{2} \ln \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \quad (5.8 \text{ a})$$

$$A_c = \lg \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \quad (5.8 \text{ б})$$

Характеристическое ослабление, измеренное в масштабе натурального логарифма (5.8а), называется непером (сокращенно Нп). Таким образом, непер — единица измерения отношения двух напряжений в масштабе натурального логарифма. Характеристическое ослабление, измеренное в масштабе десятичного логарифма (5.8б), называется белом (сокращенно Б). Бел — единица измерения отношения двух мощностей в масштабе десятичного логарифма. Поскольку бел довольно большая единица измерения, то на практике используют меньшую в десять раз единицу — децибел. Один бел составляет 10 дБ и 11,5 Нп.

Параметр  $B_c$  показывает изменение аргумента (начальной фазы) напряжения и тока сигнала при передаче через согласованно включенный четырехполюсник. Он описывается соотношением, следующим из формулы (5.7):

$$B_c = 0,5[(\varphi_{u1} - \varphi_{u2}) + (\varphi_{i1} - \varphi_{i2})] \quad (5.9)$$

Измеряется характеристическая фаза (фазовая постоянная) в радианах (сокращенно рад).

Для симметричного четырехполюсника в согласованном режиме формулы (5.8) и (5.9) преобразуются в следующие соотношения:

$$A_c = \ln(U_1 / U_2) = \ln(I_1 / I_2); \quad B_c = \varphi_{u1} - \varphi_{u2} = \varphi_{i1} - \varphi_{i2} \quad (5.10)$$

Рассмотренные величины  $\underline{Z}_{c1}$ ,  $\underline{Z}_{c2}$ , и  $\underline{\Gamma}$  полностью характеризуют четырехполюсник.

### 5.5. Рабочие параметры четырехполюсников

Рабочие параметры вводятся для оценки отклонений используемого (рабочего) режима от режима идеального согласования источника с нагрузкой.

В режиме идеального согласования источник присоединен к нагрузке посредством идеального трансформатора так, что вся мощность сигнала передается от источника в нагрузку. Такое включение показано на рис 5.10.

Воздушный (без сердечника) трансформатор на рис. 5.10 изображен в виде двух магнитно-связанных индуктивностей и имеет коэффициент трансформации  $1 : n$ , обеспечивающий выполнение условия идеального согласования  $\underline{Z}_r = \underline{Z}_n$ .

При идеальном согласовании находим мощность сигнала в нагрузке

$$\underline{U}_0 \underline{I}_0 = \frac{E^2}{4\underline{Z}_A} \quad (5.11)$$

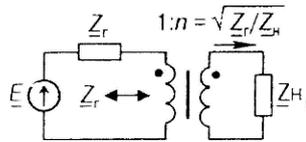


Рис. 5.10

Рабочей постоянной передачи называют половину натурального или десятичного логарифма отношения мощности, выделяемой в нагрузке в режиме идеального согласования, к мощности, выделяемой в ней в рабочем режиме:

$$e^{2\tilde{A}\delta} = \frac{U_0 I_0}{U_2 I_2} = \frac{E^2 Z_f}{U_2^2 4 Z_{\tilde{A}}}. \quad (5.12)$$

Используя алгебраическую форму комплексной величины рабочей постоянной, получим

$$\tilde{A}_D = A_p + jB_p. \quad (5.13)$$

где  $A_p$  — рабочее ослабление,  $B_p$  — рабочая фазовая постоянная.

В режиме не согласованности на входе и выходе четырехполюсника находим

$$A_p = A_c + \frac{1}{2} \operatorname{In} \left| \frac{1}{1 - \underline{\mu}_1^2} \right| + \frac{1}{2} \operatorname{In} \left| \frac{1}{1 - \underline{\mu}_2^2} \right| + \operatorname{In} \left| 1 - \underline{\mu}_1 \underline{\mu}_2 e^{-2\Gamma_c} \right|,$$

где  $\underline{\mu}$  и  $\underline{\mu}_2$  — коэффициенты отражения на входе и выходе четырехполюсника,

$$\underline{\mu}_1 = \frac{Z_{\tilde{A}} - Z_{c1}}{Z_{\tilde{A}} + Z_{c1}}, \quad \underline{\mu}_2 = \frac{Z_f - Z_{c2}}{Z_f + Z_{c2}} \quad (5.15)$$

При вещественных сопротивлениях источника и нагрузки для расчетов часто используют рабочую передаточную функцию

$$H(j\omega) = e^{-\tilde{A}\delta} = \frac{2U_2}{E} \sqrt{\frac{R_{\tilde{A}}}{R_f}}, \quad (5.16)$$

которая в показательной форме записывается следующим образом:

$$H_p(j\omega) = H_p(\omega) e^{jQ_p(\omega)} \quad (5.17)$$

где  $H_p(\omega)$  — рабочая АЧХ,  $Q_p(\omega)$  — рабочая ФЧХ.

### Тема 5.6. Регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников

Регулярным называется такое соединение нескольких четырехполюсников, при котором система уравнений передачи каждого четырехполюсника остается неизменной после соединения. При однонаправленном соединении четырехполюсников сигнал у всех четырехполюсников передается от входа соединения к его выходу. У соединений с

обратной связью сигнал передается в обоих направлениях. Различают каскадное, параллельно-параллельное, последовательно-последовательное, параллельно-последовательное и последовательно-параллельное соединения четырехполюсников.

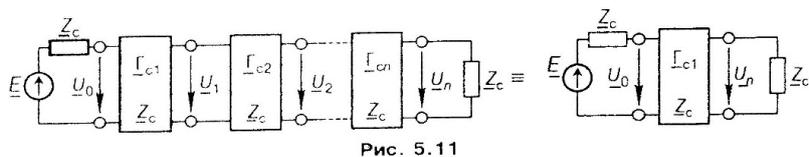


Рис. 5.11

Соединение четырехполюсников, при котором выход 1-го служит входом 2-го, выход 2-го — входом 3-го и т.д., называется каскадным (рис. 5.11).

Частным случаем каскадного соединения является каскадно-согласованное соединение симметричных четырехполюсников. Каскадное соединение нескольких таких четырехполюсников называется согласованным, если их характеристические сопротивления, а также сопротивления источника и нагрузки равны между собой. Тогда для соединения справедливо следующее соотношение:

$$\frac{U_0}{U_n} = \frac{U_0}{U_1} \frac{U_1}{U_2} \dots \frac{U_{n-1}}{U_n} \Rightarrow \tilde{A}_y = \tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 + \dots + \tilde{A}_n \quad (5.18)$$

Каскадное согласованное соединение можно заменить эквивалентным четырехполюсником с тем же характеристическим сопротивлением  $Z_c$  и характеристической постоянной передачи  $\underline{\Gamma}$ , равной сумме характеристических постоянных передач составляющих четырехполюсников (см. рис. 5.11).

В общем случае каскадное однонаправленное соединение четырехполюсников не является согласованным. Такое соединение (на примере двух), показано на рис. 5.12.

При таком соединении каждый из  $k$  четырехполюсников характеризуется своими внутренними параметрами, например  $\underline{A}_k$ -параметрами, как показано на рис. 5.11. Отличительными свойствами каскадного соединения являются равенство токов и напряжений в местах соединения соседних четырехполюсников, т.е. напряжение и ток на выходе предыдущего четырехполюсника равны напряжению и току на входе последующего четырехполюсника. Используя это свойство, можно найти матрицу параметров соединения  $(\underline{A})$ , если известны параметры каждого четырехполюсника. В соответствии с рис. 5.12 имеем  $(\underline{A}) = (\underline{A}_1)(\underline{A}_2)$ , поскольку параметры выхода первого четырехполюсника равны параметрам входа второго четырехполюсника. По аналогии можно определить матрицу каскадного соединения  $k$  четырехполюсников:  $(\underline{A}_c) = \prod_k (\underline{A}_k)$

Параллельно-параллельное соединение четырехполюсников (на примере двух) показано на рис. 5.13.

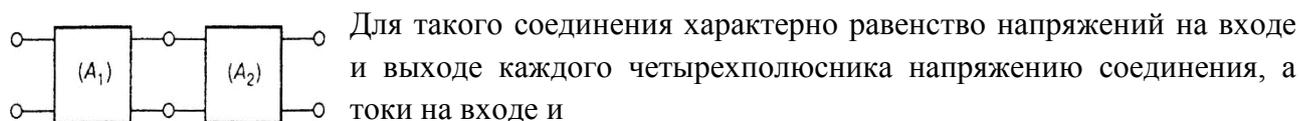


Рис. 5.12

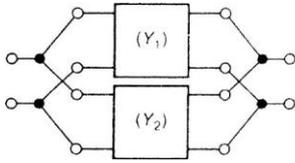


Рис. 5.13

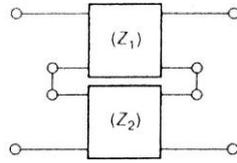


Рис. 5.14

выходе соединения равны сумме соответствующих токов четырехполюсников (см. рис. 5.12). Используя это свойство, можно доказать для системы  $\underline{Y}$ -параметров, что матрица соединения равна сумме матриц четырехполюсников:  $(\underline{Y}) = (\underline{Y}_1) + (\underline{Y}_2)$  По аналогии можно определить матрицу параллельно-последовательного соединения к четырехполюсников  $(\underline{Y}_c) = \sum_k (\underline{Y}_k)$

Последовательно-последовательное соединение четырехполюсников (на примере двух), показано на рис. 5.14, где каждый из них удобно характеризовать матрицей  $\underline{Z}$ -параметров.

При таком соединении напряжение на входе и на выходе соединения четырехполюсников равны сумме их напряжений, а токи одинаковы. Используя это свойство, можно доказать для системы  $\underline{Z}$ -параметров, что матрица соединения равна сумме матриц четырехполюсников:  $(\underline{Z}) = (\underline{Z}_1) + (\underline{Z}_2)$  аналогии можно определить матрицу последовательно-последовательного соединения к четырехполюсников  $(\underline{Z}_c) = \sum_k (\underline{Z}_k)$  Отметим, что выбор той или иной системы параметров четырехполюсников, входящих в соединение, определяется свойствами соединения, а именно как входные и выходные параметры соединения связаны с входными и выходными параметрами четырехполюсников. Выбирается та система параметров, у которой левая часть уравнений передачи соответствует этим свойствам, а правая часть одинакова.

При параллельно-последовательном соединении четырехполюсников (на примере двух), как это показано на рис. 5.15, напряжение на входе четырехполюсников и на входе соединения одинаковы. Также равны токи на выходе соединения и на выходе четырехполюсников, т.е. необходимо выбирать для удобства доказательства матрицу параметров, у которой в правой части уравнений передачи находятся напряжение на входе и ток на выходе. Очевидно, это будет матрица  $\underline{F}$ -параметров, что и показано на рис. 5.15.

Тогда матрица параметров соединения к четырехполюсников  $(\underline{F}_c) = \sum_k F_k$ . Это следует из того, что при таком соединении ток на входе соединения четырехполюсников и напряжение на выходе равны сумме соответствующих параметров четырехполюсников, а именно эти параметры входят в левую часть выбранных уравнений передачи.

Наконец, при последовательно-параллельном соединении четырехполюсников, приведенном на рис. 5.16, одинаковыми являются ток на

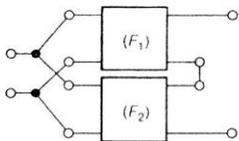


Рис. 5.15

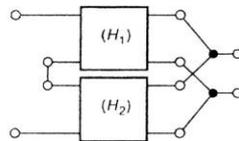
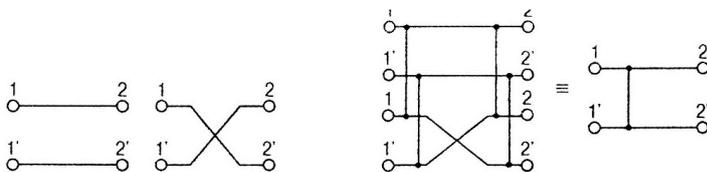


Рис. 5.16



входе и напряжение на выходе. Поэтому выбираем систему  $\underline{H}$ -параметров.

Матрица параметров такого соединения  $(\underline{H}_c) = \sum_k \underline{H}_k$ , поскольку напряжение на входе соединения четырехполюсников и ток на его выходе равны сумме соответствующих параметров четырехполюсников.

Для примера рассмотрим методику определения параметров параллельно-параллельного соединения двух простейших четырехполюсников, приведенных на рис. 5.17.

Необходимо, например, найти матрицу Л-параметров соединения.

Рассмотрим схему такого соединения, показанную на рис. 5.18, которая, как легко заметить, представляет собой первый короткозамкнутый четырехполюсник.

Очевидно, для этого частного случая Г-образного четырехполюсника (см. схему (5.2)) получим  $\underline{Z}_{1Г} = 0$  и  $\underline{Z}_{2Г} \rightarrow 0$  тогда из выражения (5.3) следует значения параметров  $\underline{A}_{11} = 1$ ,  $\underline{A}_{12} = 0$ ,  $\underline{A}_{21} = \infty$ ,  $\underline{A}_{22} = 1$ , поскольку неопределенность  $\underline{Z}_{1Г} / \underline{Z}_{2Г} = 0$ . Конечно, рассматривая эквивалентную схему соединения можно и непосредственно из уравнений передачи получить этот ответ. Действительно, при одинаковых, хотя и бесконечно малых, напряжениях на входе и выходе ток короткого замыкания  $I_1$  должен стремиться к бесконечности, отсюда следуют значения параметров  $\underline{A}_{11} = 1$ ,  $\underline{A}_{12} = 0$ ,  $\underline{A}_{21} = \infty$ ,  $\underline{A}_{22} = 1$ .

## Раздел 6. Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи

### Тема 6.1. Цепи с обратной связью

#### 6.1.1. Обратная связь

Частичную передачу сигнала с выхода на вход усилителя называют обратной связью.

Замкнутое двунаправленное соединение двух четырехполюсников, включающее в себя активный, с зависимым источником, и пассивный четырехполюсники, называется цепью с обратной связью (ОС).

Структурная схема четырехполюсника с обратной связью приведена на рис. 6.1. При таком соединении часть энергии сигнала попадает с выхода на вход, т.е. присутствует обратная связь. Четырехполюсники с комплексными передаточными функциями  $H_p(j\omega)$  и  $H_{oc}(j\omega)$  называются соответственно четырехполюсником прямой передачи (разомкнутым четырехполюсником) и четырехполюсником обратной связи.

В структурной схеме используется обозначение соединений одной линией. Такое обозначение охватывает все возможные регулярные соединения двух четырехполюсников, рассмотренные в гл. 5, а именно:

- параллельно-параллельные — это обратная связь по току, управляемая напряжением (рис. 6.2, а);
- последовательно-последовательные — это обратная связь по напряжению, управляемая током (рис. 6.2, б);
- параллельно-последовательные — это обратная связь по току, управляемая током (рис. 6.2, в);
- последовательно-параллельные — это обратная связь по напряжению, управляемая напряжением (рис. 6.2, г).

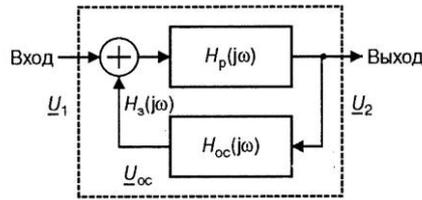


Рис. 6.1

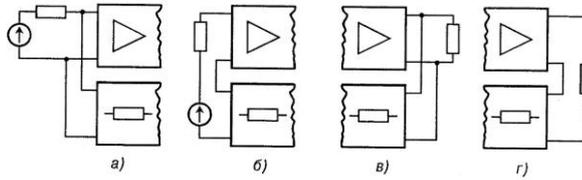


Рис. 6.2

Такие названия связаны с тем, от какого параметра зависит и на какой параметр влияет обратная связь. Например, обратная связь по току, управляемая напряжением, влияет на входной ток (в соответствии с первым законом Кирхгофа входной ток будет равен сумме токов входного источника и тока обратной связи), а ток ОС определяется выходным напряжением. Аналогично строятся названия и других соединений четырехполюсников.

Произведение комплексных передаточных функций по петле (с входа на выход и с выхода на вход) называется комплексной передаточной функцией петли или петлевой передаточной функцией

$$H_{\Pi}(j\omega) = H_p(j\omega)H_{oc}(j\omega). \quad (6.1)$$

Комплексная передаточная функция по напряжению замкнутого четырехполюсника определяется следующей зависимостью:

$$H_s(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{H_p(j\omega)}{1 - H_{oc}(j\omega)H_p(j\omega)}. \quad (6.2)$$

Из выражения (6.2) следует, что частотные свойства цепи с обратной связью существенно зависят от комплексной передаточной функции четырехполюсника обратной связи. Поэтому с помощью этого четырехполюсника можно существенно изменять частотные характеристики всей цепи.

Проводя замену  $j\omega = p$ , можно получить передаточную функцию четырёхполюсника

$$H_s(p) = \frac{H_p(p)}{1 - H_{oc}(p)H_p(p)}. \quad (6.3)$$

Формулы (6.2) и (6.3) справедливы для схемы рис. 6.1, где сигналы входного воздействия и обратной связи суммируются. Если сигнал обратной связи вычитается из входного сигнала (на входе структурной схемы в этом случае ставится вычитающее звено), то в знаменателях формул перед петлевым усилением будет знак «+». Тогда, например, формула (6.3) будет иметь следующий вид:

$$H_s(p) = \frac{H_p(p)}{1 + H_{oc}(p)H_p(p)}. \quad (6.4)$$

В зависимости от реакции замкнутого четырехполюсника на внешнее воздействие обратная связь делится на отрицательную, когда обратная связь противодействует внешнему воздействию, стремясь восстановить первоначальное состояние, и положительную, когда обратная связь поддерживает внешнее воздействие, т.е. удаляет четырехполюсник от исходного состояния.

Если петлевое усиление  $H_{\Pi}(j\omega)$  имеет положительный знак, то ОС называется положительной (ПОС), а если отрицательный, то — отрицательной (ООС). Поскольку петлевое усиление зависит от частоты, то на одних частотах ОС может быть отрицательной, а на других положительной.

### 6.1.2. Влияние ООС на параметры усилителя

Обычно обратную связь цепи используют для придания ей новых свойств или для корректировки параметров этой цепи. Это объясняется тем, что обратная связь может оказывать существенное влияние на параметры цепи. В частности, можно показать, что параллельно-параллельная ОС «уменьшает» входное и выходное сопротивление в  $[1 - H_{\Pi}(j\omega)]$  раз, а последовательно-последовательная ОС «увеличивает» входное и выходное сопротивление в  $[1 - H_{\Pi}(j\omega)]$  раз (см. рис. 6.2). Кавычки означают зависимость коэффициента изменения от частоты. Если используется ООС, то функция  $[1 - H_{\Pi}(j\omega)]$  будет положительной, равной коэффициенту  $[1 + H_{\Pi}]$ . Тогда входное сопротивление цепи с ООС действительно уменьшается или увеличится в  $[1 + H_{\Pi}]$  раз. При ПОС наблюдается противоположная зависимость.

При очень большой глубине ООС, т.е. большом модуле функции  $[1 - H_{\Pi}(j\omega)]$ , схема усилителя с ООС вырождается в схему без сопротивлений (параллельные можно отбросить, а последовательные замкнуть). Эквивалентные схемы таких усилителей приведены на рис. 6.3.

Схема рис. 6.3,а относится к усилителю с обратной связью по напряжению, управляемой напряжением. Схема рис. 6.3,б относится к усилителю с обратной связью по напряжению, управляемой током. Схема рис. 6.3,в относится к усилителю с обратной связью по току, управляемой напряжением. Схема рис. 6.3,г относится к усилителю с обратной связью по току, управляемой током. На рис. 6.3 обозначено:  $k$  — коэффициент передачи усилителя, цепи прямой передачи,  $\beta$  — коэффициент передачи пассивного четырехполюсника, цепи обратной связи. При этом усилитель приводится к одному из вариантов управляемых источников (1/ШУН, ИНУТ, ИТУН, ИГУТ соответственно, см. рис. 6.3).

При большой глубине ООС коэффициент передачи усилителя будет определяться пассивным четырехполюсником обратной связи, что следует из выражения (6.2). Действительно, при ООС находим

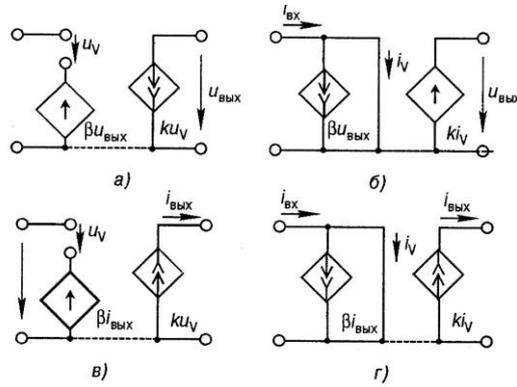


Рис 6.3

$$H_3 = \frac{k}{1 + k\beta}. \quad (6.5)$$

В результате для глубокой ООС получим

$$\lim_{k\beta \rightarrow \infty} H_3 = \frac{1}{\beta}. \quad (6.6)$$

Усилитель с такой ОС обладает высокой стабильностью, а его коэффициент усиления одинаков на всех частотах.

В качестве примера тестового задания средней трудности рассмотрим определение передаточной функции цепи обратной связи, если задана передаточная функция замкнутой цепи, например, следующего вида:

$$H_3(p) = \frac{2p + 1}{2p^3 + p^2 + 2p + 2}.$$

Преобразуем знаменатель заданной передаточной функции к следующему виду:  $1 + (2p^3 + p^2 + 2p + 1)$ . Далее используя выражение (6.4), так как в знаменателе стоит знак «+», находим передаточную функцию петли  $H_{\text{п}}(p) = H_{\text{ос}}(p)H_{\text{р}}(p) = (2p^3 + p^2 + 2p + 1)$ . Выражение для передаточной функции цепи прямой передачи соответствует числителю замкнутой передаточной функции (см. формулу (6.4)), т.е.  $H_{\text{р}}(p) = 2p + 1$ . Тогда передаточная функция цепи обратной связи будет равна результату деления полинома  $H_{\text{р}}(p)$  на полином  $H_{\text{п}}(p)$ . В результате деления находим ответ на тестовое задание:  $H_{\text{ос}}(p) = p^2 + 1$ .

## Тема 6.2. Устойчивость линейных цепей с обратной связью

Электрическая цепь называется устойчивой, если возникающие в ней рассогласования в процессе функционирования сводятся к нулю или к ограниченной величине, зависящей от параметров этой цепи. При отсутствии воздействия реакция устойчивой цепи будет равна нулю. Такая реакция в теории переходных процессов (см. главу 4) называется свободным

колебанием. Таким образом, устойчивость цепи связана с устойчивостью свободных колебаний.

Цепь, не обладающая свойством устойчивости, т.е. неустойчивая цепь, при отсутствии воздействия будет генерировать колебания. При этом знаменатель выражения комплексной передаточной функции (формула (6.2)) обращается в нуль, а выражение  $H_z(j\omega)$  обращается в бесконечность. Действительно, формально при определении комплексной передаточной функции берут отношение комплексного напряжения реакции к воздействию, которое в данном случае равно нулю. Однако физически неустойчивость возникает тогда, когда в цепи существует обратная связь, поддерживающая любое отклонение на входе цепи. Это отклонение будет нарастать благодаря обратной связи, само по себе стремясь к бесконечности. Конечно, стремление к бесконечности у реальной цепи сводится к колебательному процессу, поскольку реальная цепь состоит из реальных элементов, в частности, источники электрической энергии ограничены по величине. Таким образом, в математическом плане анализ устойчивости цепи связан с исследованием характеристического уравнения, которое определяет характер свободных колебаний.

Для цепи с ОС характеристическое уравнение получается из выражения передаточной функции (формула (8.3)) путем приравнивания к нулю знаменателя, т.е.

$$1 - H_{oc}(p)H_p(p) = 0. \quad (6.7)$$

Для линейных стационарных (с постоянными параметрами) цепей, функция  $H_{oc}(p)H_p(p)$  является дробно-рациональной, т.е. равной отношению двух полиномов. Тогда характеристическое уравнение можно записать в канонической форме, приравняв к нулю числитель уравнения (6.7) после приведения его к общему знаменателю:

$$A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0 = 0. \quad (6.8)$$

Решения характеристического уравнения являются полюсами передаточной функции цепи. Именно в этих точках передаточная функция обращается в бесконечность. Поскольку тип свободных колебаний определяется положением полюсов на  $p$ -плоскости, то по их размещению можно судить об устойчивости цепи. Для устойчивости цепи необходимо и достаточно, чтобы все полюсы ее передаточной функции размещались в левой полуплоскости, исключая мнимую ось. Действительно, из теории переходных процессов известно, что выражение, описывающее свободное колебание цепи, всегда содержит коэффициент  $\exp(\sigma_k t)$ , где  $\sigma_k$  — действительная часть  $k$ -го полюса. Этот коэффициент определяет степень затухания свободных колебаний. Если  $\sigma_k < 0$ , то свободные колебания с течением времени будут затухать, а именно в этом случае цепь устойчива и полюсы располагаются в левой полуплоскости. На рис. 6.4 для примера показаны размещения на  $p$ -плоскости полюсов устойчивой (а) и неустойчивой (б) цепи.

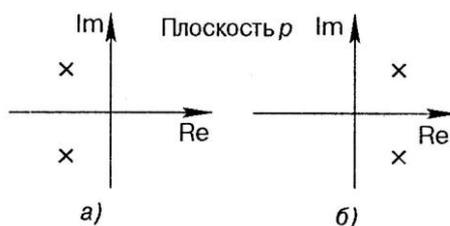


Рис 6.4

Мнимая составляющая (Im) комплексной переменной  $p = \sigma + j\omega$  отложена по оси ординат  $p$ -плоскости, а действительная (Re) — по оси абсцисс. Передаточная функция цепи имеет два комплексно-сопряженных полюса, показанных на рис. 6.4 перекрестиями. Если абсцисса полюса определяет скорость затухания свободных колебаний, то его ордината определяет частоту свободных колебаний.

Поскольку в общем случае определение полюсов связано с необходимостью решения алгебраического уравнения высокой степени, что довольно сложно без компьютера (известны лишь аналитические решения алгебраических уравнений не выше пятой степени), были разработаны методы оценки устойчивости, не связанные с необходимостью аналитического решения уравнения. Эти методы позволяют судить об устойчивости цепи по косвенным признакам без решения уравнения. Они получили название критериев устойчивости. Критерии устойчивости бывают алгебраические и геометрические (частотные). Рассмотрим наиболее типичные алгебраические критерии.

Реактансный критерий связан с доказательством того, что корни полинома, образованного из левой части характеристического уравнения, т.е. полинома

$$A(p) = A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0, \quad (6.9)$$

располагаются в левой полуплоскости. Полином обладающий таким свойством получил название полинома Гурвица.

Доказательство требует разложения в цепную дробь дробно-рациональной функции, построенной из полинома (6.9). Эта функция строится следующим способом. Полином (6.9) разбивается на четную и нечетную части, т.е. представляется в следующем виде:

$$A(p) = N_1(p) + N_2(p), \quad (6.10)$$

где  $N_1(p)$  — нечетная функция, образованная нечетными членами полинома,  $N_2(p)$  — четная функция, образованная четными членами полинома.

Далее строится дробно-рациональная функция, порядок числителя которой, например, больше порядка знаменателя, т.е. либо функция  $N_1(p)/N_2(p)$ , либо функция  $N_2(p)/N_1(p)$ . Эта функция преобразуется в цепную (лестничную) дробь. Разложение в цепную дробь осуществляется последовательным делением. Вначале делится полином числителя на полином знаменателя, поскольку это неправильная дробь (если дробь правильная, то деление наоборот). Далее знаменатель делится на остаток от первого деления, далее остаток от первого деления на остаток от второго деления и так далее. В результате записывается цепная дробь

$$\frac{N_1(p)}{N_2(p)} = A_1 p + \frac{1}{A_2 p + \frac{1}{A_3 p + \dots}}, \quad (6.11)$$

где  $A_k p$  — результаты деления.

Для того чтобы полином (6.9) был полиномом Гурвица, необходимо выполнение условия для коэффициентов цепной дроби  $A_k > 0$ . Этот критерий не обладает свойством универсальности, т.е. не справедлив для полиномов общего вида. Поэтому большее применение находит критерий Гурвица (Раусса-Гурвица).

Критерий Гурвица связан со свойствами коэффициентов характеристического уравнения цепи с ОС и заключается в следующем.

Цепь будет устойчивой, если при положительном старшем коэффициенте  $A_n$  полинома (6.9) будут положительны все  $n$  определителей Гурвица  $D_i, i = 1, \dots, n$ , выделенные из матрицы коэффициентов. Матрица коэффициентов имеет  $n$  строк и  $n$  столбцов, причем недостающие в ней элементы заменяются нулями. Левая (главная) диагональ содержит элементы, начиная с  $A_{n-1}$  и далее по убывающей до элемента  $A_0$ . Элементы строк имеют возрастающий номер. Определители выделяются из матрицы, начиная с первого элемента:

$$\begin{pmatrix} A_{n-1} & A_n & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{n-3} & A_{n-2} & A_{n-1} & A_n & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & A_0 & A_1 & A_2 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & A_0 \end{pmatrix}; D_1 = A_{n-1}; D_2 = \begin{vmatrix} A_{n-1} & A_n \\ A_{n-3} & A_{n-2} \end{vmatrix} \text{ и т.д.}$$

Таким образом, если критерий будет выполнен, то полином в левой части характеристического уравнения устойчивой цепи будет полиномом Гурвица, поскольку его корни будут располагаться в левой полуплоскости  $p$ -плоскости. Использование критерия Гурвица не требует решения характеристического уравнения, а связано лишь с исследованием матрицы коэффициентов полинома.

Типичным частотным критерием является критерий устойчивости Найквиста.

Критерий Найквиста заключается в следующем: у устойчивой цепи с обратной связью годограф петлевого усиления  $H_{\Pi}(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  не должен «охватывать» критическую точку  $[+1, j_0]$ . Годографом (иногда называют «диаграммой Найквиста») называется траектория конца вектора  $H_{\Pi}(j\omega)$  на комплексной плоскости. Если представить комплексную функцию  $H_{\Pi}(j\omega)$  в алгебраической форме  $H_{\Pi}(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega)$ , то на комплексной плоскости, где по оси абсцисс откладывается реальная часть  $R(\omega)$ , а по оси ординат мнимая часть  $Q(\omega)$ , комплексную функцию можно представить в виде вектора. При изменении частоты конец этого вектора опишет годограф. Поэтому такая плоскость еще называется плоскостью годографа. На рис. 6.5 для примера приведены годографы устойчивой (а) и неустойчивой (б) цепи.

Приведенные годографы относятся к цепи, обладающей устойчивостью в разомкнутом виде, т.е. устойчивой при отсутствии обратной связи. Для астатических цепей, содержащих интеграторы в петле (нейтрально устойчивые разомкнутые цепи), годограф будет уходить в бесконечность при стремлении частоты к нулю. Поэтому установить факт охватывания характерной точки затруднительно, да и для случая статических разомкнутых цепей рис. 6.6 охватывание несколько условно при таком изменении частоты. Чаще при определении устойчивости цепи по критерию Найквиста изменяют частоту от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Тогда годограф статических цепей будет замкнутой кривой, а годограф астатических цепей замыкают через дугу «бесконечного» радиуса. В этом случае легко установить факт охватывания характерной точки  $[+1, j_0]$ . Отметим, что для построения годографа можно менять частоту лишь от 0 до  $\infty$ , поскольку годограф для отрицательных частот будет симметричной кривой относительно оси абсцисс. Это свойство годографа объясняется тем, что у физически-реализуемых цепей функция  $R(\omega)$  четная, а функция  $Q(\omega)$  нечетная.

Критерий Найквиста удобно использовать тогда, когда известны частотные характеристики разомкнутой цепи, поскольку АЧХ это длина вектора, а ФЧХ угол наклона вектора. Тогда построение годографа осуществить довольно легко.

### Тема 6.3. Автоколебательные цепи

Автогенератором или генератором с самовозбуждением называется электрическая цепь, в которой без посторонних воздействий возникают колебания. Автогенератор предназначен для преобразования энергии источника постоянного тока в энергию электрических колебаний. Обобщенная схема автогенератора содержит усилитель и четырехполюсник обратной связи, как это показано на рис. 6.б.

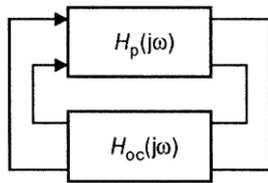


Рис. 6.6

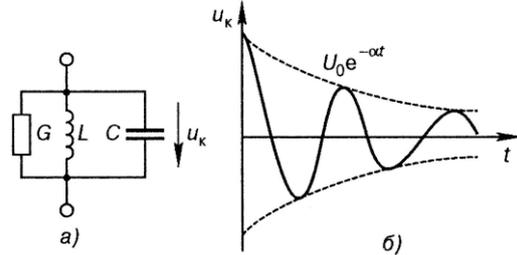


Рис. 6.7

Коэффициенты передачи звеньев схемы рис. 6.6 подобраны так, чтобы можно было выполнить условие

$$H_p(j\omega)H_{oc}(j\omega) = 1. \quad (6.12)$$

Обычный параллельный колебательный контур при отсутствии воздействия может выдавать только затухающие колебания. На рис. 6.7, а приведена схема колебательного контура, где  $G$  — проводимость потерь контура. На рис. 6.7, б показана временная диаграмма свободных колебаний контура при условии, что его добротность  $Q \gg 1$ .

Амплитуда свободных колебаний показана на рис. 6.7,б пунктирной линией, причем коэффициент затухания  $\alpha$  соответствует действительной части  $\sigma$  двух комплексно-сопряженных полюсов этой цепи, которые располагаются в левой полуплоскости.

Если к контуру подключить управляемый источник тока, например, ИТУН с достаточной по величине отрицательной передаточной проводимостью  $G_{вн}$ , то колебания становятся возрастающими, как показано на рис. 6.8, б.

При этом полюсы из левой полуплоскости переходят в правую полуплоскость  $p$ -плоскости, поскольку общие (эквивалентные) потери в контуре  $G_3$  станут отрицательными:

$$G_3 = G + G_{вн} < 0.$$

Реализовать отрицательную проводимость  $G_{вн}$  можно с помощью усилителя, охваченного положительной ОС. Такие автогенераторы получили название автогенераторов с обратной связью. Отрицательную проводимость можно также реализовать в явном виде, если использовать элемент с отрицательным сопротивлением, например, туннельный диод. Эти автогенераторы получили название автогенераторов с отрицательным сопротивлением. Иногда их называют автогенераторами с внутренней ОС, а первые с внешней ОС.

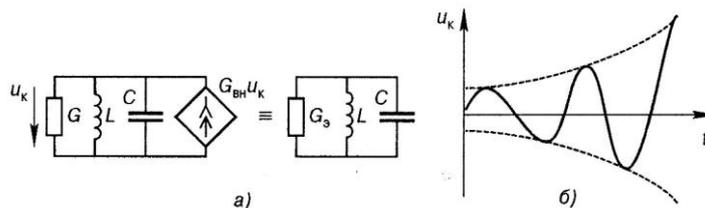


Рис. 6.8

## Стационарный режим автогенератора. Балансы амплитуд и фаз

Для того чтобы на выходе автогенератора существовало незатухающее колебание, необходимо и достаточно выполнить условие (6.12). В этом случае полюсы передаточной функции цепи с обратной связью будут находиться на мнимой оси  $p$ -плоскости. Неизбежные потери, возникающие в цепях автогенератора, будут компенсироваться положительной достаточной обратной связью, в частности достаточным коэффициентом усиления усилительного каскада в цепи прямой передачи. Поскольку в левой части уравнения (6.12) стоит комплексная функция, то оно выполняется при двух условиях. Эти условия легко получить из показательной формы уравнения. Имеем

$$H_p(j\omega)H_{oc}(j\omega) = |H_{oc}(j\omega)H_p(j\omega)|e^{j\varphi_n(\omega)} = 1. \quad (6.13)$$

Далее находим два условия: баланса амплитуд

$$|H_{oc}(j\omega)H_p(j\omega)| = 1 \quad (6.14)$$

и баланса фаз

$$\varphi_n(\omega) = \varphi_p(\omega) + \varphi_{oc}(\omega) = \pm 2\pi k, \quad (6.15)$$

где  $k$  — натуральный ряд чисел, включая нуль.

В автогенераторе условия (6.14) и (6.15) поддерживаются автоматически. Действительно, величина  $H_p(\omega)$  зависит от амплитуды сигнала на входе усилителя, работающего в нелинейном режиме (см. схему рис. 6.6), т.е. от величины напряжения обратной связи. Поэтому при изменении амплитуды колебаний изменяется коэффициент усиления таким образом, чтобы компенсировать возникшее изменение (при увеличении амплитуды коэффициент усиления уменьшается и наоборот). Баланс фаз обеспечивается выбором ФЧХ петли и также поддерживается автоматически. Таким образом, амплитуда колебаний в автогенераторе определяется балансом амплитуд, а частота колебаний определяется балансом фаз. Стационарный режим работы автогенератора характеризуется установившейся амплитудой колебаний. Если при возникновении колебаний полюсы передаточной функции находятся в правой полуплоскости, то по мере установления стационарного режима они смещаются влево и в стационарном режиме располагаются на мнимой оси. При этом ордината этих полюсов определяет частоту колебаний автогенератора.

Тестовые задания по оценке устойчивости цепей с обратной связью, а также по оценке параметров стационарного режима работы автогенераторов отличаются, как правило, легкой нормой трудности, поскольку требуют знания довольно простых формул и ограниченного количества понятий. Например, требуется определить матрицу, соответствующую полиному Гурвица  $2p^3 + 4p^2 + 3p + 1$  для оценки устойчивости цепи. В соответствии с критерием Гурвица размер матрицы будет  $3 \times 3$  и ее легко записать в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & 0 \\ 1 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

очевидно, правильной будет и транспонированная матрица.

## Тема 6.4. Различные схемы автогенераторов

Для генерации колебаний высокой частоты используются трехточечные схемы автогенераторов на транзисторах, реже на лампах. Различают индуктивную и емкостную трехточку, в зависимости от того, к какому элементу колебательного контура подключены три полюса транзистора (база, эмиттер и коллектор). Естественно, элемент, к которому подключен транзистор должен иметь три зажима (катушка индуктивности имеет ответвление либо емкость образуется двумя последовательносоединенными конденсаторами). Для примера схема типичной индуктивной трехточки приведена на рис. 6.9.

На транзисторе собрана схема усилителя с общим эмиттером. Вход активного элемента автогенератора — транзистора VT через разделительные емкости  $C_3$  и  $C_6$  подключен к индуктивности  $L_2$  колебательного контура. Такое подключение обеспечивает баланс фаз. Усилитель создает сдвиг фаз  $\varphi_p(\omega) = \pi$ , и такое подключение контура дает сдвиг фаз  $\varphi_{oc}(\omega) = \pi$ , т.е. баланс фаз (6.15) выполняется. Сопротивление разделительных емкостей на частоте генерации пренебрежимо мало. При помощи сопротивления  $R_6$  осуществляется выбор рабочей точки транзистора (ток смещения протекает от «+» источника  $E$  через сопротивление смещения  $R_6$  далее через участок база-эмиттер на общую шину и «—» источника). Условие возникновения колебаний (самовозбуждение автогенератора) обеспечивается выбором коэффициента включения контура.

Схема автогенератора на туннельном диоде для сверхвысоких частот представлена на рис. 6.10, а.

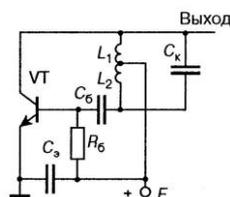


Рис. 6.9

Конденсатор  $C_1$  является блокировочным. Он имеет достаточную по величине емкость, чтобы его сопротивлением на частоте генерации можно было пренебречь.

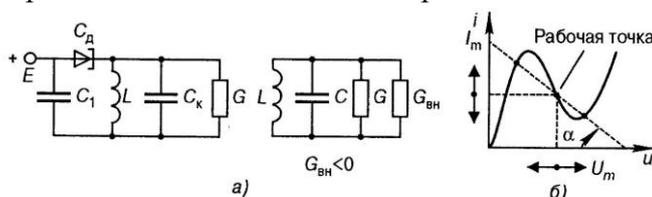


Рис. 6.10

На рис. 6.10,б приведена ВАХ туннельного диода, имеющего участок отрицательного сопротивления, который обеспечивает компенсацию потерь колебательного контура путем внесения отрицательной проводимости  $G_{вн} = -tg \alpha$ . На осях координат показан размах напряжения и тока на диоде, а пунктирной линией показана линия средней крутизны характеристики. Эквивалентная схема генератора содержит емкость  $C = C_k + C_0$ , которая учитывает внутреннюю емкость туннельного диода.

Поскольку время переключения туннельных диодов чрезвычайно мало (порядка  $10^{-13}$  с), то они хорошо работают на сверхвысоких частотах.

LC-генераторы для низких частот не используются из-за чрезмерно больших значений (и как следствие больших габаритов) индуктивностей.

Для генерации колебаний низкой частоты используются различные схемы RC-генераторов. На рис. 6.11, а для примера показана схема RC-генератора с обратной связью через дифференцирующие цепи.

Поскольку один каскад усилителя с общим эмиттером дает сдвиг фаз  $\varphi_p(\omega) = \pi$ , цепь обратной связи для выполнения ближайшего условия баланса фаз должна еще добавить сдвиг  $\varphi_{oc}(\omega) = \pi$ . Одна дифференцирующая RC-цепь может обеспечить сдвиг фаз в пределах от 0 до  $\pi/2$ . Известно, что ФЧХ дифференцирующей RC-цепи описывается выражением  $[\pi/2 - \arctg(\omega RC)]$ . Тогда требуемый сдвиг фаз могут обеспечить минимум как три дифференцирующие цепи.

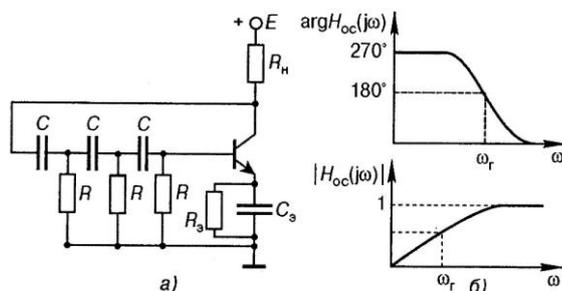


Рис. 6.11

На рис. 6.11,б показана результирующая ФЧХ цепи обратной связи из трех дифференцирующих цепей, создающая необходимый сдвиг фаз на частоте генерации  $\omega_r$ . Из этого условия можно найти значение частоты генерации, считая все три дифференцирующие цепи одинаковыми

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{6}RC}. \quad (6.16)$$

Параллельно-соединенные  $R_3C_3$  в цепи эмиттера схемы рис. 6.11,а обеспечивают выбор и стабилизацию рабочей точки усилителя. Баланс амплитуд в схеме достигается достаточной величиной коэффициента усиления транзисторного усилителя.

## Раздел 7. Электрические фильтры

### Тема 7.1. Основные понятия и определения

Электрическим фильтром называют четырехполюсник, пропускающий электрические колебания в определенной полосе частот, называемой полосой пропускания (ПП) и не пропускающий электрические колебания в другой полосе частот, называемой полосой задерживания (ПЗ). Фильтры являются частным случаем четырехполюсников, рассмотренных в гл. 5. Поэтому они также описываются характеристическими либо, что чаще, рабочими параметрами. Рабочие параметры предусматривают обеспечение ослабления в полосе пропускания ниже определенного уровня, а в полосе задерживания — выше определенного уровня. Это лучше соответствует основному назначению фильтров.

По характеру зависимости модуля их комплексной передаточной функции (АЧХ) от частоты  $H(f)$  электрические фильтры подразделяются на фильтры: нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ), полосовые (ПФ) и режекторные (РФ). На рис. 7.1 приведены идеальные амплитудно-частотные характеристики соответствующих фильтров.

Показанные на рис. 7.1 АЧХ являются идеальными, поскольку фильтры с такими характеристиками идеально соответствуют своему назначению. Однако характеристики реальных фильтров могут значительно отличаться от приведенных на рисунке. Граничные частоты  $f_r$  определяют границы полос пропускания и задерживания.

Структурное обозначение ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ представлено на рис. 7.2. Перечеркнутая волнистая линия обозначает своим расположением диапазон частот, который задерживается фильтром. Например, у ФНЧ задерживаются верхние частоты и так далее.

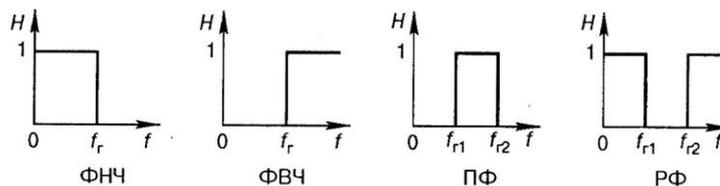


Рис. 7.1

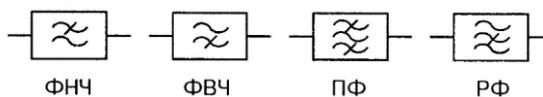


Рис. 7.2

Одним из основных параметров фильтра является зависимость его рабочего ослабления от частоты. Рабочее ослабление фильтра показывает, на сколько децибелл полная мощность, выделяемая в нагрузку на его выходе, меньше полной максимальной мощности, которую может отдать источник в согласованную нагрузку. Рабочее ослабление оценивается в децибелах и определяется следующей формулой:

$$A_p = 10 \lg \left( \frac{U_{ист}^2 / (4Z_{ист})}{U_2^2 / Z_2} \right). \quad (7.1)$$

Рабочая комплексная передаточная функция  $H_p(j\omega)$  непосредственно связана с рабочим ослаблением фильтра  $A_p$  следующим соотношением:

$$|H_p(j\omega)|^2 = 10^{-0,1A_p} \quad \text{или} \quad A_p = 10 \lg \frac{1}{|H_p(j\omega)|^2}. \quad (7.2)$$

Большинство фильтров относятся к линейным цепям с сосредоточенными параметрами, поэтому их передаточные функции являются дробно-рациональными. Используя различные методы аппроксимации идеальных передаточных функций дробно-рациональными функциями (например, по Тейлору, по Чебышеву, метод наименьших квадратов и другие), можно получить разнообразные полиномиальные функции фильтрации. В зависимости от аппроксимирующей функции (функции фильтрации) фильтры делятся на фильтры Баттерворта, Чебышева, Золотарева, Кауэра, Гаусса и другие.

Функция фильтрации  $\psi^2(\Omega)$  однозначно связана с передаточной функцией и, например, для ФНЧ определяется формулой

$$H_p^2(\Omega) = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \psi^2(\Omega)}, \quad (7.3)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент неравномерности ослабления,  $\Omega = \omega/\omega_{\text{п}} = f/f_{\text{п}}$  — нормированная (безразмерная) частота,  $\omega_{\text{п}}$  — граничная частота полосы пропускания.

На рис. 7.3 для примера показан график функции фильтрации идеального ФНЧ.

При изменении нормированной частоты от 0 до 1 функция фильтрации равна нулю, а для частот больших 1 функция фильтрации стремится к бесконечности. Если подставить эту функцию в выражение (7.3), то в результате получим АЧХ идеального ФНЧ, показанную на рис. 7.1.

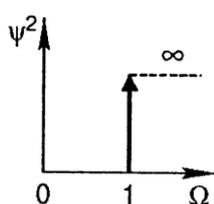


Рис. 7.3

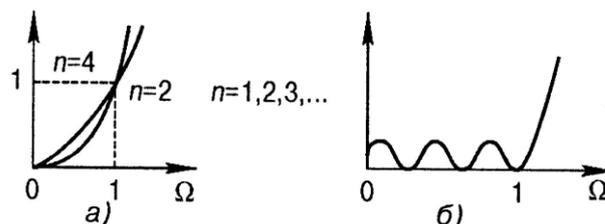


Рис. 7.4

Если в качестве функции фильтрации использовать полином Баттерворта

$$\psi^2(\Omega) = \Omega^{2n}, \quad (7.4a)$$

то получатся фильтры Баттерворта. При использовании в качестве функции фильтрации полиномов Чебышева

$$\psi^2(\Omega) = T_n^2(\Omega), \quad (7.4b)$$

где полином Чебышева

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \arccos \Omega) & \text{при } \Omega < 1; \\ \text{ch}(n \text{Arch} \Omega) & \text{при } \Omega \geq 1 \end{cases} \quad (7.5)$$

приходим к фильтрам Чебышева. Соответствующие графики ослабления для таких ФНЧ приведены на рис. 7.4.

На рис. 9.4,а показано изменение ослабления для двух ФНЧ Баттерворта, порядок которых равен 2 и 4. Чем больше порядок ФНЧ, тем круче кривая ослабления, которая в соответствии с формулами (7.2) и (7.3) определяется как

$$A_p = 10 \lg(1 + \varepsilon^2 \Omega^{2n}). \quad (7.6a)$$

При  $n$  стремящемся к бесконечности приходим к ослаблению идеального ФНЧ.

На рис. 7.4,б показано изменение ослабления для ФНЧ Чебышева шестого порядка. Ослабление в полосе пропускания последовательно изменяется  $n$  раз от нуля до  $A_{p \text{ max}}$ . Рабочее ослабление ФНЧ Чебышева

$$A_p = 10 \lg[1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)]. \quad (7.6b)$$

При расчете требования к фильтрам задают с помощью рабочих параметров (см. разд. 5.6) в следующем составе:

$A_{p \text{ max}}$  — максимально допустимое ослабление в ПП,

$A_{p \text{ min}}$  — минимально допустимое ослабление в ПЗ,

$f_{\text{п}}$  — граничная частота ПП (для РФ ПФ задаются  $f_{\text{п1}}$  и  $f_{\text{п2}}$ ),

$f_3$  — граничная частота ПЗ (для ПФ и РФ задаются  $f_{31}$  и  $f_{32}$ ).

На рис. 7.5 приведена общая схема нагруженного фильтра. Однако при синтезе фильтра считают, что сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление источника (генератора) являются резистивными, т.е.  $Z_H = R_H$ ,  $Z_G = R_G$ . Такой подход не уменьшает общности результатов, поскольку фильтр является реактивным четырехполюсником и реактивность нагрузки и источника можно отнести к фильтру.

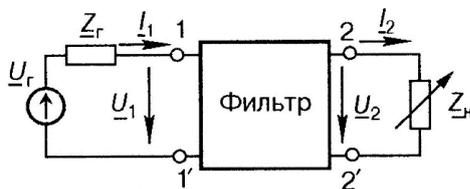


Рис. 7.5

Со стороны входных зажимов нагруженный фильтр рис. 7.5 при синтезе рассматривают как двухполюсник, обладающий некоторым входным комплексным сопротивлением. На таком подходе основан метод синтеза, который носит название метода Дарлингтона.

## Тема 7.2. Нормированные частоты и сопротивления

При расчете фильтров используют результаты синтеза для нормированных сопротивлений и частот. Такой подход при синтезе делает эти результаты универсальными, т.е. их можно использовать для самых разнообразных исходных данных.

Нормирование — деление исходной величины на эталон. В качестве эталонного (нормирующего) сопротивления  $R_0$  выбирают сопротивление нагрузки, т.е.  $R_0 = R_H$ . Тогда, например, некоторое нормированное операторное сопротивление будет определяться соотношением

$$Z'(p) = Z(p)/R_0. \quad (7.7)$$

В качестве эталонной (нормирующей) частоты  $\omega_0$  выбирают граничную частоту полосы пропускания или среднегеометрическое значение двух таких частот, т.е. нормированной частотой будет

$$\Omega = \omega/\omega_0 = f/f_0. \quad (7.8)$$

На рис. 7.6 показаны графики рабочего ослабления для ФНЧ и ПФ.

Для ФНЧ нормирующей частотой будет полоса пропускания, а для ПФ среднегеометрическое значение нижней и верхней полос пропускания, как показано на рис. 7.6.

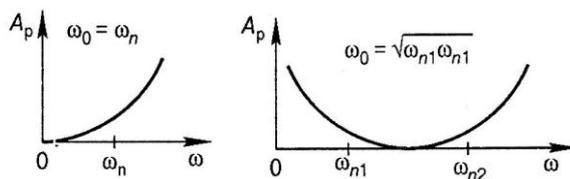


Рис. 7.6

Нормирование сопротивления и частоты приводит к нормированию индуктивности и емкости в схеме фильтра. Нормированные величины, обозначенные штрихом сверху, будут безразмерными. Для перехода к реальным значениям величин используют операцию

денормирования, т.е. денормирование это переход от нормированной к исходной величине по следующим формулам:

$$Z(p) = Z'(p/\omega_0)R_0, \quad L = (R_0/\omega_0)L',$$

$$C = \frac{1}{R_0\omega_0}C', \quad R = R_0R'. \quad (7.9)$$

Коэффициенты денормирования совпадают по размерности с исходными величинами:

$$k_L = \frac{R_0}{\omega_0} [\text{Гн}]; \quad k_C = \frac{1}{R_0\omega_0} [\text{Ф}]; \quad k_R = R_0 [\text{Ом}]. \quad (7.10)$$

Нормирование позволяет получить расчетные формулы в общем виде, пригодном для различных значений граничных частот и сопротивлений нагрузки.

### Тема 7.3. Преобразование шкалы частот

Специального вида подстановка аргумента (частоты)  $\Omega' = f(\Omega)$  в выражение для рабочей АЧХ  $H_p(\Omega')$  позволяет перейти от синтезированного ФНЧ к любому другому типу фильтра — ФВЧ, ПФ, РФ:

$$\begin{aligned} \text{ФНЧ} \rightarrow \text{ФВЧ}: \quad \Omega' &= -\frac{1}{\Omega_{\text{вч}}}; \\ \text{ФНЧ} \rightarrow \text{ПФ}: \quad \Omega' &= \frac{1}{\Omega_{\text{рч}} - 1/\Omega_{\text{рч}}}; \\ \text{ФНЧ} \rightarrow \text{РФ}: \quad \Omega' &= \Omega_{\text{пч}} - \frac{1}{\Omega_{\text{пч}}}. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Таким образом, при синтезе разнообразных фильтров можно ограничиться лишь синтезом ФНЧ-прототипа, а затем путем простой замены переменной получить нужный фильтр. Такой способ называется преобразованием шкалы частот.

Метод преобразования шкалы частот позволяет проводить расчет любого фильтра по следующим этапам:

- по заданным требованиям к фильтру определяют требования к ФНЧ-прототипу,
- решают задачу синтеза (нахождения схемы) для ФНЧ-прототипа,
- схему ФНЧ-прототипа преобразуют в схему заданного фильтра (с помощью таблицы перехода),
- производят денормирование элементов фильтра по формулам (7.9).

Преобразование схемы ФНЧ — прототипа в схему необходимого фильтра при преобразовании шкалы частот производится путем интерпретации каждого элемента прототипа в новое схемное качество в соответствии с табл. 7.1.

Таблица 7.1

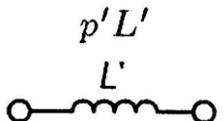
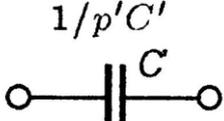
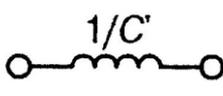
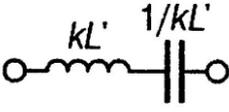
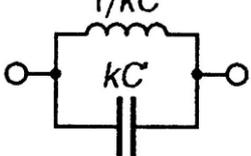
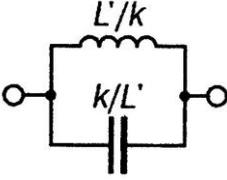
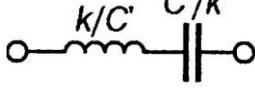
Исходная схема ФНЧ			$\omega'f = f_0\Omega'$
--------------------	---	--	-------------------------

Схема согласно подстановке $p' = 1/p$ ФВЧ	$L'/p$ $1/L'$ 	$p/C'$ $1/C'$ 	$\Omega = 1/\Omega' \quad f = f_0\Omega$
Схема согласно подстановке $p' = k(p + 1/p)$ ПФ	$kL'(p + 1/p)$ $kL' \quad 1/kL'$ 	$1$ $kC'(p + 1/p)$ $1/kC'$ $kC'$ 	$\Omega = \sqrt{\left(\frac{\Omega'}{2k}\right)^2 + 1} \pm \frac{\Omega'}{2k};$ $f = f_0\Omega$
Схема согласно подстановке $p' = \frac{1}{k(p+1/p)}$ РФ	$L'$ $k(p + 1/p)$ $L'/k$ $k/L'$ 	$k(p + 1/p)$ $C'$ $k/C'$ $C'/k$ 	$\Omega = \sqrt{\left(\frac{1}{2k\Omega'}\right)^2 + 1} \pm \frac{1}{2k\Omega'};$ $f = f_0\Omega$

#### Тема 7.4. Основы синтеза ФНЧ-прототипа

Синтез ФНЧ-прототипа ставит своей задачей найти схему фильтра и параметры всех его элементов. Схема включения нагруженного ФНЧ- прототипа, который необходимо синтезировать, показана на рис. 7.7.

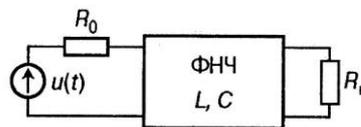


Рис. 7.7

Исходными данными для синтеза ФНЧ являются:  $f_{\Pi}$ , кГц, — граничная частота ПП;  $f_3$ , кГц, — граничная частота ПЗ;  $A_{p \max}$ , дБ, — неравномерность ослабления в ПП;  $A_{p \min}$ , дБ, — минимальное ослабление в ПЗ;  $R_{и} = R_{н}$ , Ом, — сопротивление источника (генератора) и нагрузки. Синтез фильтра основан на методе Дарлингтона.

Алгоритм синтеза включает несколько этапов.

1. Нормализуем полосу задерживания  $f_3$  относительно полосы пропускания  $f_{\Pi}$  в соответствии с формулой (9.8), т.е.  $\Omega_3 = f_3/f_{\Pi}$ .

2. Находим коэффициент неравномерности, используя формулы (7.6а), (7.6б) на частоте  $\Omega_{\Pi} = 1$ , т.е.  $\varepsilon = \sqrt{10^{0,1A_{p \max}} - 1}$ .

3. Вычисляем число реактивных элементов ФНЧ-прототипа, используя формулу (7.5) или (7.6) на частоте  $\Omega_3$ , т.е. для ФНЧ Баттерворта находим

$$n \geq \frac{\lg A}{2 \lg \Omega_3}, \quad (7.12)$$

где

$$A = (10^{0,1A_{p \min}} - 1)/\varepsilon^2; \quad (7.13)$$

для ФНЧ Чебышева получим

$$n \geq \frac{\ln(\sqrt{A} + \sqrt{A - 1})}{\ln(\Omega_3 + \sqrt{\Omega_3^2 - 1})}. \quad (7.14)$$

Далее округляем  $n$  в формулах (7.12) и (7.14) до ближайшего целого числа большего  $n$ , поскольку число элементов не может быть дробным. Например, если  $n = 3,2$ , то выбираем  $n = 4$ .

4. Для определения передаточной функции ФНЧ-прототипа находим полюсы передаточной функции в соответствии со следующими формулами.

Для ФНЧ Баттерворта

$$\underline{S}_k = \sqrt[n]{\frac{1}{\varepsilon}} \cos\left(\pi \frac{n-1+2k}{2n}\right) + j \sqrt[n]{\frac{1}{\varepsilon}} \sin\left(\pi \frac{n-1+2k}{2n}\right), \quad (7.15)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Для ФНЧ Чебышева

$$\underline{S}_k = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{x} - x \right) \sin\left(\pi \frac{2k-1}{2n}\right) + j \left( \frac{1}{x} + x \right) \cos\left(\pi \frac{2k-1}{2n}\right) \right], \quad (7.16)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $x = \sqrt[n]{1/\varepsilon + \sqrt{1/\varepsilon^2 + 1}}$ .

5. Определяем рабочую передаточную функцию ФНЧ-прототипа  $H_p(p)$  путем представления знаменателя в виде произведения постоянной и  $n$  линейных множителей, поскольку ее полюсы (корни знаменателя) определены. Далее знаменатель передаточной функции, который является полиномом Гурвица, можно представить в виде полинома степени  $n$ .

6. Находим входное операторное сопротивление нагруженного ФНЧ в виде дробно-рациональной функции следующего вида:

$$Z_{\text{вх}}(p) = R_{\text{и}} \frac{1 - \mu(p)}{1 + \mu(p)}, \quad (7.17)$$

где коэффициент отражения  $\mu(p)$  определяется найденной рабочей передаточной функцией в соответствии с уравнением

$$\mu(p)\mu(-p) = 1 - H_p(p)H_p(-p). \quad (7.18)$$

7. Формула входного операторного сопротивления раскладывается в цепную дробь. Причем, если первым элементом фильтра является индуктивность, то

$$Z_{\text{вх}}(p) = L_{\text{нор}}p + \frac{1}{C_{\text{нор}}p + \dots + \frac{1}{R_{\text{нор}}}}. \quad (7.17a)$$

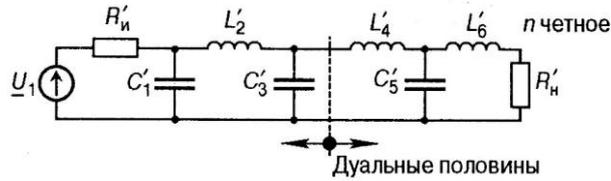


Рис. 7.8

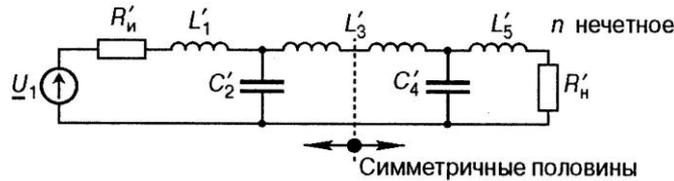


Рис. 7.9

Если первым элементом фильтра является емкость, то раскладываем ее в цепную дробь следующего вида:

$$Z_{\text{вх}}(p) = \frac{1}{C_{\text{нор}}p + \dots + \frac{1}{R_{\text{нор}}}}. \quad (7.18a)$$

При ускоренном синтезе вместо  $Z_{\text{вх}}(p)$  строят операторное входное сопротивление только половины фильтра  $Z_{\text{вх}2}(p)$ .

8. В зависимости от четности или нечетности  $n$  получают схему фильтра с нормированными параметрами.

На рис. 7.8 показана схема ФНЧ с четным числом элементов, например шестого порядка. На рис. 7.9 приведена схема ФНЧ с нечетным числом элементов, например, пятого порядка. Нормированные величины на приведенных схемах обозначены штрихом сверху.

9. Производим денормирование элементов фильтра в соответствии с формулами (9.9).

Только в случае четного порядка ФНЧ Чебышева при разложении в цепную дробь может получиться, что  $R'_н \neq 1$ . Это означает, что сопротивление  $R_0$  не может быть равным  $R_н$ .

Пусть, например, получено  $R'_н = \alpha \neq 1$ . Для того чтобы сопротивление нагрузки оказалось равно заданному, денормирование следует проводить по следующим формулам (вместо  $R_н$  следует подставлять  $R_н/\alpha$ ):

$$R_0 = \frac{1}{\alpha^2} R_н; \quad R_н = \alpha \frac{R_н}{\alpha} = R_н; \quad (7.19)$$

$$L_i = L_{\text{нор},i} \frac{R_н}{2\pi f_2 \alpha}; \quad C_i = C_{\text{нор},i} \frac{\alpha}{2\pi f_2 R_н}.$$

10. Строим график функции рабочего ослабления  $A_p(\Omega)$ , по которому проверяется выполнение данных, заданных для синтеза.

### 4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Исследование элементов линейной электрической цепи постоянного тока	2	Работа в малых группах (2 часа)
2	1.	Исследование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока	2	Работа в малых группах (2 часа)
3	1.	Исследование принципа наложения токов	1	Работа в малых группах (1 час)
4	1.	Исследование двухполюсников	2	Работа в малых группах (2 часа)
5	2.	Исследование элементов линейной электрической цепи переменного тока	2	Работа в малых группах (2 часа)
6	2.	Исследование разветвленной линейной цепи синусоидального тока	2	Работа в малых группах (2 часа)
7	3.	Исследование электрических цепей первого порядка	6	Работа в малых группах (6 часов)
8	2.	Исследование последовательного колебательного контура	2	Работа в малых группах (2 часа)
9	2.	Исследование параллельного колебательного контура	4	Работа в малых группах (4 часа)
10	5.	Исследование связанных колебательных контуров	8	Работа в малых группах (8 часов)
11	7.	Исследование характеристик электрических фильтров	4	Работа в малых группах (4 часа)
<b>ИТОГО</b>			<b>35</b>	<b>35</b>

### 4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование практической работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Закон Ома и законы Кирхгофа	2	-
2	1.	Методы анализа цепей постоянного тока	6	-
3	1.	Баланс мощности и потенциальная диаграмма	2	-
4	1.	Тестирование по теме «Основные законы и общие методы анализа электрических цепей»	2	-

5	2.	Понятие о методе комплексных амплитуд.	2	-
6	2.	Энергетические соотношения в простейших цепях при гармоническом воздействии	2	-
7	2.	Тестирование по теме «Режим гармонических колебаний»	2	-
8	2.	Расчет частотных характеристик	4	-
9	2.	Тестирование по теме «Частотные характеристики»	1	-
10	3.	Классический метод анализа переходных процессов.	2	-
11	3.	Переходные процессы в одиночном колебательном контуре	2	-
12	3.	Операторный метод анализа переходных процессов	2	-
13	3.	Тестирование по теме «Режим негармонических воздействий»	4	-
14	4	Тестирование по теме «Цепи с распределенными параметрами»	4	-
15	5.	Тестирование по теме «Четырехполюсники»	4	-
16	6.	Тестирование по теме «Цепи с обратной связью»	6	-
17	7.	Тестирование по теме «Электрические фильтры»	6	-
<b>ИТОГО</b>			<b>53</b>	<b>-</b>

#### 4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа, курсовая работа

##### Семестр 3 Контрольная работа

Цель: освоить основные методы расчета цепей постоянного тока.

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает выполнение студентом следующих разделов:

1. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа;
2. Определить токи во всех ветвях методом узловых потенциалов и сделать проверку по первому закону Кирхгофа;
3. Рассчитать мощности на всех участках цепи, составить баланс мощностей;
4. Выполнить расчет методом контурных токов;
5. Результаты расчета токов, выполненного двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой;
6. Методом эквивалентного генератора определить ток в ветви № 1.
7. Для контура, содержащего две ЭДС, построить потенциальную диаграмму.

Основная тематика: Расчет токов в ветвях электрической цепи постоянного тока различными методами

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 15 - 17 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

Выдача задания, защита КР проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
зачтено	Во время защиты контрольной работы студент демонстрирует знание основных определений и продемонстрировал умение использовать методы расчета электрических цепей постоянного тока, владение достаточным уровнем понимания материала, и способностью самостоятельно высказать мысль на научно-техническом языке.
не зачтено	Во время защиты контрольной работы студент показал слабое понимание теоретического материала и навыков владения практическими приемами расчета цепей постоянного тока.

#### Семестр 4 Курсовая работа

Цель: получить навыки расчета частотных и переходных характеристик цепей 2-го порядка.

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает выполнение студентом следующих разделов:

1. Рассчитать:
  - а) комплексное входное сопротивление  $Z_{ВХ}(j\omega)$ , его амплитудно - частотную характеристику  $Z_{ВХ}(\omega)$  и фазово-частотную характеристику  $\varphi_z(\omega)$ .
  - б) передаточную функцию по напряжению  $H_U(j\omega)$ , его АЧХ  $H_U(\omega)$  и ФЧХ  $\varphi(\omega)$ .
2. Построить графики  $Z_{ВХ}(\omega)$ ,  $\varphi_z(\omega)$ ,  $H_U(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  при заданных элементах схемы.
3. Построить годографы  $Z_{ВХ}(j\omega)$ ,  $H_U(j\omega)$ .
4. Рассчитать и построить график переходной характеристики.

Выдача задания, защита КР проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки курсовой работы
отлично	Во время защиты курсовой работы студент демонстрирует знание все основных определений и продемонстрировал уверенное умение использовать методы расчета частотных и переходных характеристик, владение достаточным уровнем понимания материала, и способностью самостоятельно высказать мысль на научно-техническом языке.
хорошо	Во время защиты курсовой работы студент показал не полное понимание материала и навыков владения практическими приемами.
удовлетворительно	Во время защиты курсовой работы студент показал слабое понимание материала и навыков владения практическими приемами.
неудовлетворительно	Во время защиты курсовой работы студент не продемонстрировал теоретических знаний по теме работы, либо не показал ни каких практических навыков.

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>			<i>Σ комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub>, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ОПК</i>	<i>ПК</i>					
		<i>4</i>	<i>7</i>	<i>16</i>				
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1. Основные законы и общие методы анализа цепей	36	+	+	+	3	12	ЛК,ЛР,ПЗ,СРС	зачет, кр, тесты
2.Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей	42	+	+	+	3	14	ЛК,ЛР,ПЗ,СРС	зачет, тесты, КР
3. Режим негармонических воздействий	44	+	+	+	3	14,7	ЛК,ЛР,ПЗ,СРС	экзамен, тесты, КР
4.Цепи с распределенными параметрами	30	+	+	+	3	10	ЛК,ПЗ,СРС	экзамен, тесты
5.Четырехполюсники	34	+	+	+	3	11,3	ЛК,ЛР,ПЗ,СРС	экзамен, тесты
6.Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи	18	+	+	+	3	6	ЛК,ПЗ,СРС	экзамен, тесты
7.Электрические фильтры	21	+	+	+	3	7	ЛК,ЛР,ПЗ,СРС	экзамен, тесты
<i>всего часов</i>	<b>225</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>3</b>	<b>75</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Основы теории цепей. Практикум : учеб. пособие для вузов / Г. Н. Арсеньев, И. И. Градов. - Москва : Форум; Инфра-М, 2007. - 336 с.
2. Основы теории цепей : учебное пособие для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук ; Под ред. В. П. Бакалова . - 4-е изд. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2013. - 596 с.
3. Основы теории цепей. В 2-х т. : учеб. пособие для вузов / А.И.Астайкин, А.П.Помазков. - Москва : Академия, 2009 - Т.2. - 288 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ, КР, кр)	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1.	Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.	Лк, ПЗ,КР, кр	25	1
2.	Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.	ЛР	25	1
<b>Дополнительная литература</b>				
3.	Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.	Лк, ПЗ, КР, кр	6	0,4
4.	Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.	Лк, ЛР	50	1

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ [http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>

## **9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/практическим работам**

#### **Лабораторная работа №1**

##### **Исследование элементов линейной электрической цепи постоянного тока**

###### Цель работы:

Освоение методики моделирования электрических цепей на ЭВМ; построение и анализ вольтамперных характеристик элементов линейных электрических цепей

###### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему и задать параметры её элементов
2. Последовательно замыкая и размыкая переключки резисторов  $R_1$ – $R_4$ , измеряя ток и напряжение, заполнить таблицу, составленную по форме 2.1. По результатам эксперимента построить ВАХ идеального источника ЭДС.
3. Заменить в схеме источник ЭДС источником постоянного тока, задать параметры источника. Повторить предыдущий эксперимент, результаты занести в таблицу (см. форму 2.1). Построить ВАХ идеального источника тока.
4. Создать в программе Multisim схему, изображённую на рис.2.5, задать параметры источников энергии.
5. Подключить реальный источник напряжения к системе резисторов  $R_1$ – $R_4$ . Замыкая и размыкая переключки, измеряя ток и напряжение, заполнить таблицу (см. форму 2.1). Повторить эксперимент для реального источника тока. Построить ВАХ реальных источников электрической энергии.
6. Провести анализ построенных характеристик, сделать выводы.

###### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и её цель.
2. Электрические схемы, выполненные в программе.
3. Таблицы с экспериментально определёнными данными.
4. Результаты графических построений – вольтамперные характеристики исследуемых элементов.
5. Основные выводы по работе.

###### Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения по теме лабораторной работы.

###### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

###### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

###### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Чему равны внутренние сопротивления идеальных источников ЭДС и тока?
2. Как осуществить эквивалентное преобразование реального источника ЭДС в реальный источник тока и обратно?
3. Дайте определение понятий «линейная электрическая цепь», «нелинейная электрическая цепь».
4. Как определить предельно допустимый ток, протекающий через резистор?
5. Чему равны внутренние сопротивления амперметра и вольтметра?

#### **Лабораторная работа №2**

##### **Исследование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока**

###### Цель работы:

Получение навыка моделирования сложных электрических схем на ЭВМ; анализ

разветвлённой электрической цепи постоянного тока.

Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему цепи, задать значения параметров её элементов.
2. Измерить токи в ветвях исследуемой схемы. Результаты эксперимента занести в таблицу.
3. Включив в схему индикаторы-вольтметры, измерить напряжения на резисторах. Результаты эксперимента занести в вышеуказанную таблицу.
4. Приняв внутренние сопротивления измерительных приборов равными нулю, рассчитать токи в ветвях исследуемой схемы методом уравнений Кирхгофа. Рассчитать напряжения на резисторах. Результаты расчётов занести в таблицу.
5. По результатам расчётов составить уравнение баланса мощностей.
6. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура цепи.
7. Сделать выводы по работе, отражающие степень соответствия расчётных и опытных данных.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и её цель.
2. Электрические схемы, выполненные в программе.
3. Основные расчётные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определёнными величинами.
5. Результат графических построений.
6. Основные выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения по теме лабораторной работы.

Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте обобщенный закон Ома.
2. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
3. Опишите алгоритм расчета электрических цепей методом уравнений Кирхгофа.
4. Какие контуры называют независимыми? Укажите количество независимых контуров в исследуемой цепи?
5. Как определить активную мощность источников электрической энергии?
6. Как определить активную мощность, потребляемую резистором?

**Лабораторная работа №3**

**Исследование принципа наложения токов**

Цель работы:

Экспериментальная проверка справедливости принципа суперпозиции; расчёт линейной электрической цепи постоянного тока методом наложения.

Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему и задать значения параметров ее элементов .
2. Измерить токи в ветвях исследуемой схемы. Результаты эксперимента занести во второй столбец таблицы.
3. Заменяв участок ветви с источником  $E_6$  короткозамкнутым отрезком, измерить токи в ветвях цепи. Результаты эксперимента занести в третий столбец вышеуказанной таблицы.
4. Вернувшись к исходной схеме, заменить участок ветви с источником  $E_1$  короткозамкнутым отрезком. Измерить токи в ветвях цепи. Результаты эксперимента занести в четвертый столбец таблицы.

5. Рассчитать токи в ветвях исходной схемы методом наложения, приняв внутренние сопротивления амперметров равными нулю. Для расчета частичных токов воспользоваться методом узловых потенциалов и методом контурных токов. Результаты расчетов занести в таблицу .

6. Сделать выводы по работе, отражающие степень соответствия расчетных и опытных данных.

#### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Схемы исследуемой электрической цепи, выполненные в программе.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определенными данными.
5. Основные выводы по работе.

#### Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения по теме лабораторной работы.

##### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

##### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте принцип суперпозиции.
2. Для каких электрических цепей справедлив принцип суперпозиции, объясните, почему?
3. Опишите алгоритм расчета электрической цепи методом наложения.
4. Опишите алгоритм расчета электрической цепи методом контурных токов.
5. Опишите алгоритм расчета электрической цепи методом узловых потенциалов

### **Лабораторная работа №4**

#### **Исследование двухполюсников**

##### Цель работы:

Экспериментальная проверка теоремы об активном двухполюснике, расчет линейной электрической цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора.

##### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему и задать параметры ее элементов .

2. Включив в схему индикатор-амперметр, измерить ток в исследуемой ветви. Результат эксперимента занести в таблицу.

3. Разомкнуть исследуемую ветвь относительно узловых точек. Подключить к зажимам оставшейся части схемы (АД) вольтметр и измерить напряжение холостого хода  $U_{xx}$ . Результат эксперимента занести в вышеуказанную таблицу.

4. Отключить вольтметр. Подключить к зажимам АД амперметр и измерить ток короткого замыкания  $I_{кз}$ .

5. Определить величину входного сопротивления цепи по формуле

$$R_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}.$$

Результат расчета занести в таблицу.

6. Создать в программе схему замещения цепи, подключив исследуемую ветвь к зажимам ЭГ. Измерить ток в этой ветви с помощью индикатора-амперметра.

7. Рассчитать теоретически ток в исследуемой ветви методом эквивалентного генератора. Результаты расчетов занести в таблицу.

8. Сделать выводы по работе, отражающие степень соответствия расчетных и опытных данных.

#### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Электрические схемы, выполненные в программе: исходная, для режима холостого хода, для режима короткого замыкания, схема замещения.

3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определенными данными.
5. Основные выводы по работе.

**Задания для самостоятельной работы:**

Изучить основные теоретические положения по теме лабораторной работы.

**Основная литература**

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

**Дополнительная литература**

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

**Контрольные вопросы для самопроверки**

1. Дайте определения понятий: «двухполюсник», «активный двухполюсник», «пассивный двухполюсник».
2. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике.
3. Опишите алгоритм расчета тока в исследуемой ветви методом эквивалентного генератора?
4. Как экспериментально определить параметры эквивалентного генератора?.

**Лабораторная работа №5**

**Исследование элементов линейной электрической цепи переменного тока**

**Цель работы:**

Исследование свойств элементов линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока; анализ амплитудно-фазовых соотношений в RC и RL цепях.

**Порядок выполнения:**

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему, задать параметры ее элементов. Сопротивление измерительного шунта  $R_{ш}$  принять равным 0,01 Ом.
2. Измерить действующее значение тока в цепи, результат занести в таблицу.
3. Подключив к схеме осциллограф, снять временные диаграммы напряжения и тока. Определить по диаграммам начальную фазу тока, результат занести в вышеуказанную таблицу.
4. Переключив осциллограф в режим отображения зависимости В/А, построить фазовую диаграмму цепи.
5. Заменяв в исходной схеме резистор R конденсатором с указанной емкостью, выполнить пункты 2 – 4.
6. Провести аналогичные эксперименты для катушки с индуктивностью L, приняв сопротивление  $R_{ш}$  равным 1 Ом.
7. Создать схему, задать параметры ее элементов. Сопротивление  $R_{ш}$  принять равным 1 Ом.
8. Определить показания амперметра и вольтметров. Результаты занести в таблицу
9. Подключив к схеме осциллограф, снять временные диаграммы тока в цепи и напряжений на ее элементах. Определить по диаграммам начальные фазы напряжений, результаты занести в вышеуказанную таблицу.
10. Заменяв конденсатор катушкой с заданной индуктивностью L, выполнить пункты 8–9.
11. Приняв сопротивление измерительного шунта равным нулю, рассчитать действующее значение тока и его начальную фазу для схем, указанных в пунктах 1, 5, 6.
12. Для схем, указанных в пунктах 7, 10 рассчитать действующие значения тока и напряжений на каждом элементе, построить векторные диаграммы.
13. Сделать выводы по работе, отражающие степень соответствия расчетных и опытных данных.

**Форма отчетности:**

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Электрические схемы, выполненные в программе.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблицы с экспериментально и теоретически определенными данными.
5. Результаты графических построений: временные, фазовые и векторные диаграммы.
6. Основные выводы по работе.

**Задания для самостоятельной работы:**

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятий «электрическая цепь синусоидального тока», «векторная диаграмма».
2. Опишите свойства активного сопротивления в цепи синусоидального тока.
3. Опишите свойства идеального индуктивного элемента в цепи синусоидального тока.
4. Опишите свойства идеального емкостного элемента в цепи синусоидального тока.
5. Постройте качественную векторную диаграмму последовательной RL (RC) цепи.

### Лабораторная работа №6

#### **Исследование разветвленной линейной цепи синусоидального тока**

#### Цель работы:

Исследование свойств разветвленной линейной электрической цепи синусоидального тока, расчет ее параметров символическим методом.

#### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать схему исследуемой электрической цепи и задать параметры ее элементов.
2. Включив в схему приборы-индикаторы, измерить действующие значения токов в ветвях цепи и напряжений на ее участках. Результаты эксперимента занести в таблицу.
3. Приняв внутренние сопротивления приборов равными нулю, составить для исходной схемы систему уравнений Кирхгофа, записав ее в дифференциальной и символической форме. Рассчитать комплексные действующие значения токов в ветвях; результаты занести в вышеуказанную таблицу.
4. По результатам расчетов составить уравнение баланса комплексных мощностей и проверить выполнение его условий.
5. Для точек показанных на схеме рассчитать комплексные потенциалы; определить напряжения на участках цепи.
6. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.
7. Сравнить результаты экспериментов и расчетов, сделать выводы.

#### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Электрическая схема, выполненная в программе.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определенными величинами.
5. Результаты графических построений: векторная и топографическая диаграммы.
6. Основные выводы по работе.

#### Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Опишите алгоритм расчета электрической цепи синусоидального тока символическим методом.
2. Сформулируйте закон Ома для комплексных величин, запишите его уравнение.
3. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа для комплексных величин, запишите их уравнения.
4. Как определить активную, реактивную и полную мощности в цепи синусоидального тока?
5. Запишите уравнение баланса комплексной мощности, объясните смысл его составляющих.

6. Опишите порядок построения топографической диаграммы.

### **Лабораторная работа №7**

#### **Исследование электрических цепей первого порядка**

##### **Цель работы:**

Исследование переходных и частотных характеристик электрических цепей первого порядка.

##### **Порядок выполнения:**

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему исследуемой цепи, задать значения параметров элементов. Функциональный генератор установить в режим формирования прямоугольных однополярных положительных импульсов ( $\text{Offset}=0.5$ ) с амплитудой 1В ( $\text{Amplitude}=0.5\text{V}$ ) и скважностью ( $\text{Duty Cycle}$ ) 50%. Осциллограф установить в режим синхронизации по каналу А.

2. Запустив моделирование, получить на экране осциллографа устойчивое изображение входного и выходного сигналов. Подобрать оптимальные параметры измерительных каналов: чувствительность и длительность развертки.

3. В диалоговом окне Analysis Graphs, выделив переходную характеристику RC-цепи и график входного сигнала – ступенчатого воздействия. Сохранить полученный результат в графический файл \*.gta.

4. Создать принципиальную электрическую схему, задать параметры элементов.

5. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение сигналов. Частоту генератора подобрать в пределах  $F=2\dots 5\text{Гц}$ . Сохранить полученный результат в графический файл \*.gta.

6. В исследуемой схеме заменить осциллограф Бode-плоттером, установить прибор в режим измерения АЧХ, выбрать для вертикальной оси линейный масштаб, а для горизонтальной – логарифмический. Провести измерения передаточной АЧХ цепи. Установив Бode-плоттер в режим Phase, провести измерения передаточной ФЧХ. Сохранить полученный результат в графический файл \*.gta.

7. Повторить п. 6 для RL-цепи.

8. Для заданных электрических цепей рассчитать переходные функции  $I_C(t)$ ,  $U_L(t)$  и частотные зависимости. По результатам расчетов построить соответствующие графики.

9. По результатам экспериментов определить постоянные времени и граничные частоты цепей, сравнить полученные значения с расчетными, сделать выводы.

##### **Форма отчетности:**

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Электрическая схема, выполненная в программе.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определенными величинами.
5. Результаты графических построений: векторная и топографическая диаграммы.
6. Основные выводы по работе.

##### **Задания для самостоятельной работы:**

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

##### **Основная литература**

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатьев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

##### **Дополнительная литература**

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

##### **Контрольные вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение понятий: «единичное ступенчатое воздействие», «коммутация», «переходной процесс».

2. Что называют переходной характеристикой цепи, постоянной времени? Как определить постоянную времени по экспериментальным переходным характеристикам?

3. Сформулируйте первый и второй законы коммутации.

4. Опишите алгоритм расчета переходных процессов классическим методом.

5. Дайте определение понятий: «комплексная частотная характеристика», «амплитудно-частотная характеристика», «фазо-частотная характеристика».

6. Что называют граничной частотой и полосой пропускания? Как определить граничную частоту по экспериментальным частотным характеристикам?

7. Запишите формулу расчета комплексного коэффициента передачи RC-цепи (RL-цепи).

### **Лабораторная работа №8**

#### **Исследование последовательного колебательного контура**

##### **Цель работы:**

Исследование переходных и частотных характеристик последовательного колебательного контура.

##### **Порядок выполнения:**

1. В программе Multisim создать принципиальную электрическую схему цепи, задать параметры ее элементов. Установить функциональный генератор в режим формирования прямоугольных однополярных импульсов с амплитудой  $A=0,5$  В и скважностью 0,5 %.

2. Запустив моделирование, подобрать частоту генератора таким образом, чтобы график выходного сигнала переходил к установившемуся значению в пределах входного импульса. Результат измерений сохранить в графический файл \*.gra.

3. Добавить в цепь сопротивление потерь  $R_2$ . Измерить переходную характеристику, результат сохранить в графический файл \*.gra.

4. Создать схему электрической цепи, задать параметры ее элементов.

5. Установить плоттер в режим измерения АЧХ с линейными масштабами по осям. Запустить моделирование и подобрать параметры плоттера так, чтобы экран прибора включал большую часть АЧХ. Переключить прибор в режим измерения передаточной ФЧХ. Результаты измерений сохранить в файл типа \*.gra.

6. Включить в схему последовательно с резистором  $R$  сопротивление  $R_2$ . С помощью плоттера измерить передаточные АЧХ и ФЧХ цепи. Сохранить результаты измерений в графический файл \*.gra.

7. Удалив из исследуемой схемы резистор  $R_2$ , включить параллельно конденсатору  $C$  сопротивление нагрузки  $R_3$ . С помощью Бод-плоттера измерить АЧХ и ФЧХ колебательного контура. Сохранить результаты измерений в файл типа \*.gra.

8. С помощью Бод-плоттера измерить АЧХ и ФЧХ входного сопротивления. Сохранить результаты измерений.

9. Для переходных характеристик, полученных в п. 2 и 3 определить число периодов  $n$ , за которые амплитуда гармонического колебания уменьшается в 10 раз, рассчитать постоянные затухания  $\tau=1/\delta$ . Результаты занести в отчет.

10. Для электрических цепей, указанных в п. 4, 6 и 8 рассчитать добротности  $Q$ ; определить по графику АЧХ: значение резонансной частоты  $f_0$ , коэффициент передачи контура  $k_{\max}(f_0)$ , полосу пропускания  $S$ . Результаты расчетов и измерений занести в таблицу.

11. Для электрической цепи, указанной в п.8, определить по графику входной АЧХ сопротивление контура на резонансной частоте, результат показать на графике и занести в отчет.

12. Сделать вывод о влиянии сопротивления потерь на переходную характеристику колебательного контура.

13. Сделать выводы относительно влияния внутреннего сопротивления генератора и сопротивления нагрузки на избирательные свойства контура.

##### **Форма отчетности:**

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и ее цель.
2. Электрическая схема, выполненная в программе.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Таблица с экспериментально и теоретически определенными величинами.
5. Результаты графических построений: векторная и топографическая диаграммы.
6. Основные выводы по работе.

##### **Задания для самостоятельной работы:**

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

##### **Основная литература**

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

##### **Дополнительная литература**

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятий: «последовательный колебательный контур», «характеристическое сопротивление контура», «добротность».
2. Объясните физический смысл явления резонанса. Какой вид резонанса характерен для рассмотренного в работе контура?
3. Запишите формулы расчета входных частотных характеристик последовательного колебательного контура.
4. Запишите формулы расчета передаточных частотных характеристик последовательного колебательного контура.
5. Чем определяются избирательные свойства одиночного колебательного контура? По каким формулам определяют граничные частоты и полосу пропускания?
6. Как рассчитать эквивалентную добротность и эквивалентную полосу пропускания последовательного колебательного контура.

### Лабораторная работа №9

#### **Исследование параллельного колебательного контура**

##### Цель работы:

Исследование входных и передаточных частотных характеристик параллельного колебательного контура, а также анализ влияния сопротивления нагрузки на избирательные свойства рассматриваемой цепи.

##### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать схему исследуемой электрической цепи и задать параметры ее элементов. Установить Бode-плоттер в режим измерения АЧХ с линейными масштабами по осям.
2. Начать моделирование и подобрать параметры плоттера так, чтобы экран прибора включал большую часть АЧХ. Переключить прибор в режим измерения входной ФЧХ. Результаты измерений сохранить в файл типа \*.gra.
3. Создать принципиальную электрическую схему цепи, задать параметры элементов.
4. Запустить моделирование и, настроив Бode-плоттер, измерить передаточные АЧХ и ФЧХ контура. Результаты измерений сохранить в файл типа \*.gra.
5. Включить в схему параллельно конденсатору С сопротивление нагрузки  $R_n$ , задать его параметры.
6. С помощью плоттера измерить передаточные АЧХ и ФЧХ цепи. Результаты измерений сохранить в графический файл \*.gra.
7. Повторить п. 6 для схемы с сопротивлением нагрузки  $R_{n2}$ .
8. Для исследуемой электрической цепи рассчитать характеристическое сопротивление  $\rho$  и резонансную частоту  $f_0$ . Результаты занести в отчет.
9. Для электрических цепей, указанных в п. 3, 5 и 8, рассчитать добротность Q; определить по графику передаточной АЧХ: значение резонансной частоты  $f_0$ , коэффициент передачи контура  $K_{\text{Imax}}(f_0)$ , полосу пропускания S. Результаты расчетов и измерений занести в таблицу.
10. Сделать выводы относительно влияния сопротивления нагрузки на избирательные свойства контура.

##### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название работы и цель ее проведения.
2. Схемы исследуемых электрических цепей, выполненные в программе.
3. Графики экспериментальных частотных характеристик.
4. Таблица с экспериментально определенными данными.
5. Основные расчетные соотношения.
6. Основные выводы по работе.

##### Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

##### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

##### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия «параллельный колебательный контур». Какой вид резонанса характерен для такого контура?
2. Запишите формулы расчета резонансной частоты, характеристического сопротивления и добротности.
3. По каким формулам рассчитывают входные частотные характеристики параллельного колебательного контура?
4. Какой характер носит входное сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте, объясните почему?
5. Запишите формулы расчета передаточных частотных характеристик параллельного колебательного контура.
6. Как рассчитать граничные частоты и полосу пропускания ненагруженного параллельного колебательного контура?
7. Запишите формулы расчета эквивалентной добротности и эквивалентной полосы пропускания параллельного колебательного контура.

### **Лабораторная работа №10**

#### **Исследование связанных колебательных контуров**

##### Цель работы:

Исследование влияния коэффициента связи на форму частотных характеристик связанных колебательных контуров и на полосу пропускания

##### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать схему системы связанных контуров, задать параметры ее элементов. Значение индуктивности связи принять равным  $L_{св1}$ .
2. С помощью Бode-плоттера получить графики АЧХ и ФЧХ входного сопротивления. Результаты измерений сохранить в графический файл \*.gra.
3. Приняв значение индуктивности связи равным сначала  $L_{св2}$ , а затем  $L_{св3}$  выполнить п. 2.
4. Создать принципиальную электрическую схему исследуемой цепи (рис.11.6) и задать параметры ее элементов. Значение индуктивности связи принять равным  $L_{св1}$ .
5. С помощью Бode-плоттера получить графики передаточных АЧХ и ФЧХ системы. Результаты измерений сохранить в графический файл \*.gra.
6. Приняв значение индуктивности связи равным сначала  $L_{св2}$ , а затем  $L_{св3}$  выполнить п. 5.
7. Для схем, указанных в п. 1 и 3 рассчитать значение добротности, резонансной частоты, коэффициентов связи. Результаты расчетов включить в отчет.
8. Для схем, указанных в п. 1 и 3 по графикам входных АЧХ с помощью визирной линии определить: резонансную частоту  $f_0$ , значение входного сопротивления  $Z_{вх}(f_0)$ , частоты связи  $f_1$ ,  $f_{11}$ . Результаты измерений занести в таблицу.
9. Для схем, указанных в п. 4 и 6 по графикам передаточных АЧХ с помощью визирной линии определить: резонансную частоту  $f_0$ , значение коэффициента передачи на резонансной частоте  $K_{УС}(f_0)$ , частоты связи  $f_1$ ,  $f_{11}$ , полосу пропускания  $S_{св}$ . Результаты измерений занести в таблицу.
10. Сделать выводы о влиянии коэффициента связи на входное сопротивление и избирательные свойства системы связанных контуров.

##### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер, название работы и цель ее проведения.
2. Схемы исследуемой электрической цепи, выполненные в программе.
3. Графики частотных характеристик цепи, полученные в программе.
4. Таблицы с экспериментально определенными данными.
5. Основные расчетные соотношения.
6. Выводы по работе.

##### Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

##### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия «связанные колебательные контуры». Перечислите основные виды связей. Какой вид связи используется в цепи, рассмотренной в работе?
2. Что называют сопротивлением связи, первичным и вторичным контурами цепи? Укажите эти элементы на исследуемой схеме.
3. Запишите формулу расчета коэффициента связи применительно к автотрансформаторной схеме.
4. По какой формуле рассчитывают входное сопротивление системы связанных контуров?
5. Дайте определение понятия «вносимое сопротивление». Запишите формулы расчета активного и реактивного вносимых сопротивлений.
6. Чему равно входное сопротивление системы связанных контуров на резонансной частоте, объясните почему?
7. Что называют фактором связи? Постройте и объясните вид резонансных кривых связанных контуров при различных значениях фактора связи.
8. Что называют быстрой и медленной частотами связи? Запишите формулы расчета этих величин.
9. Как определить полосу пропускания связанных контуров при наличии слабой связи, при критической связи, при сильной связи, в предельном режиме?

#### Лабораторная работа №11

##### **Исследование характеристик электрических фильтров**

##### Цель работы:

Исследование основных характеристик пассивных электрических фильтров.

##### Порядок выполнения:

1. В программе Multisim создать П-образную схему ФНЧ, задать параметры ее элементов. Подключить к выходным зажимам фильтра сопротивление нагрузки  $R_{Н1}$ .
2. Включив в схему Бode-плоттер измерить зависимость входного сопротивления фильтра от частоты  $Z_{ВХ}(f)$ . Результат измерения сохранить в графический файл \*.gra.
3. С помощью Бode-плоттера измерить частотные зависимости:

$$K_U(f) = \frac{U_1}{U_2}(f),$$

$$\varphi(f) = (\varphi_{U_1} - \varphi_{U_2})(f).$$

При проведении эксперимента следует учесть, что диапазон частот, отображаемый на дисплее прибора, должен включать как полосу прозрачности, так и полосу задерживания. Результат измерения сохранить в текстовый файл \*.bod.

4. Создать Т-образную схему ФВЧ, задать параметры ее элементов. Подключить к выходным зажимам фильтра сопротивление нагрузки  $R_{Н1}$ .

5. Выполнить п. 2 и 3.

6. Создать Т-образную схему ПФ, задать параметры его элементов. Подключить к выходным зажимам ПФ сопротивление нагрузки  $R_{Н2}$ .

7. Выполнить п. 2 и 3.

8. Для исследуемых электрических цепей рассчитать: характеристическое сопротивление  $Z_C$ ; частоты среза  $f_{ср}$ ,  $f_{ср1}$ ,  $f_{ср2}$ .

9. По результатам измерений рассчитать частотные зависимости  $\alpha(f)$  и  $\beta(f)$ . Для этого необходимо:

а) преобразовать данные, сохраненные в файлах \*.bod, в формат электронной таблицы MS Excel;

б) рассчитать значения функций:

$$\alpha(f) = \ln(\text{Gain}); \quad \beta(f) = \text{Phase},$$

где Gain и Phase – значения частотных зависимостей  $K_U(f)$  и  $\varphi(f)$ , отображаемые в одноименных столбцах.

10. Построить по полученным зависимостям графики, объяснить их отличие от теоретических характеристик.

11. Сделать выводы по работе.

### Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретические данные по теме лабораторной работы.

#### Основная литература

1. Теория электрических цепей: лабораторный практикум / И. В. Игнатъев, Ю. Н. Булатов. - Братск : БрГУ, 2014. - 104 с.

#### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1-3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. - Санкт-Петербург : Питер, 2006.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятий: «электрический фильтр», «полоса прозрачности», «полоса затухания».
2. Какие четырехполюсники называют k-фильтрами? Перечислите основные виды таких фильтров, укажите их преимущества и недостатки.
3. По какой формуле рассчитывают собственную меру передачи четырехполюсника? Объясните смысл составляющих этой формулы.
4. Какими уравнениями описываются изменения коэффициента затухания и коэффициента фазы в пределах полосы прозрачности?
5. Какие уравнения описывают изменения коэффициента затухания и коэффициента фазы в пределах полосы затухания?
6. Запишите формулы расчета характеристического сопротивления, коэффициента затухания и коэффициента фазы применительно к T-фильтру низких частот.
7. По каким формулам рассчитывают характеристическое сопротивление, коэффициент затухания и коэффициент фазы П-фильтра высоких частот?
8. Запишите формулы расчета характеристического сопротивления, коэффициента затухания и коэффициента фазы применительно к полосовому фильтру.

## Практическое занятие №1

### **Закон Ома и законы Кирхгофа**

#### Цель занятия:

Приобрести навыки расчета электрических цепей с помощью закона Ома и законов Кирхгофа.

#### Задание:

##### Задача 1.1.

Для цепи, приведенной на рис. 1.1, рассчитать токи в ветвях с резистивными сопротивлениями, используя закон Ома при условии, что  $E_1 = E_2 = 10$  В;

$$E_3 = 20 \text{ В}; R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}.$$

#### Пример решения.

Цепь содержит два узла и три ветви. Обозначим токи ветвей и зададим их положительные направления (рис. 1.2).

Идеальный источник ЭДС  $E_3$  задает напряжение между узлами  $a$  и  $b$ . Учитывая, что стрелка ЭДС направлена в сторону большего потенциала (т.е. к плюсу), получаем  $U_{ab} = E_3$ . Теперь по закону Ома рассчитываем токи в ветвях с резистивными сопротивлениями:

$$I_1 = \frac{E_1 + E_3}{R_1} = 2 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{E_3 - E_2}{R_2 + R_3} = 0,5 \text{ А}.$$

Значение второго тока получилось отрицательным, следовательно, действительное направление данного тока противоположно направлению, выбранному нами.

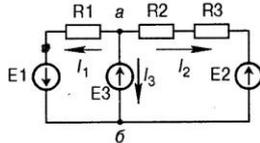
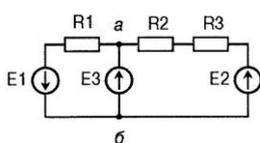


Рис. 1.1

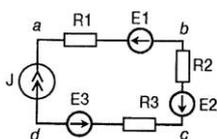


Рис. 1.3

Рис. 1.2

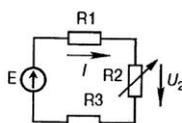


Рис. 1.4

Задача 1.2.

В цепи, приведенной на рис. 1.3, записать напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{ad}$ ,  $U_{db}$ , считая заданными все параметры цепи ( $J$ ,  $E$ ,  $R$ ).

Пример решения.

Цепь представляет собой одиночный замкнутый контур, в который включены как источники напряжения, так и идеальный источник тока. Последний задает протекающий в цепи ток, т.е. определяет и его направление, и его величину.

Из обобщенного закона Ома можно записать

$$U_{12} = I \sum R - \sum E.$$

Здесь положительное направление тока задавалось от точки 1 к точке 2, а ЭДС учитывалась со знаком плюс, если совпадала по направлению с током, и со знаком минус, если была ему противоположна.

При записи  $U_{12}$  напряжение на резистивном сопротивлении берется со знаком плюс, если ток совпадает по направлению с  $U_{12}$ , и со знаком минус, если противоположен. ЭДС записывается со знаком минус, если она совпадает по направлению с  $U_{12}$ , и со знаком плюс, если противоположна.

Для заданной цепи напряжения запишутся в следующем виде:

$$U_{ab} = R_1 J + E_1; \quad U_{ac} = R_1 J + E_1 + R_2 J - E_2;$$

$$U_{ad} = (R_1 + R_2 + R_3)J + E_1 - E_2 + E_3; \quad U_{db} = -(R_2 + R_3)J + E_2 - E_3.$$

Задача 1.3.

Построить график зависимости напряжения на переменном сопротивлении  $R_2$  от тока цепи (рис. 1.4), если  $R_2$  меняется в пределах от нуля до бесконечности.

Пример решения.

Цепь представляет собой одиночный замкнутый контур, следовательно, ток в ней может быть рассчитан по закону Ома. Положительное направление тока в данном случае задается направлением единственной в цепи ЭДС, и они будут сонаправлены. При этом

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

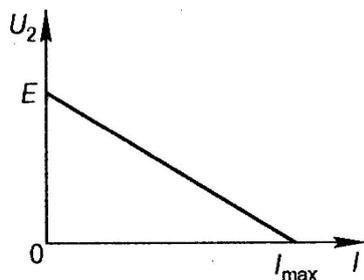


Рис. 1.5

$$U_2 = E - (R_1 + R_3)I.$$

Напряжения на сопротивлении  $R_2$  по закону Ома для пассивного участка цепи можно записать как произведение тока на сопротивление.

Ток цепи и напряжение  $U_2$  сонаправлены, следовательно,

$$U_2 = R_2 I$$

Запишем напряжение  $U_2$  как напряжение на участке цепи, включающем источник напряжения и сопротивления  $R_1$  и  $R_3$ :

(1.1)

В формуле (1.1) изменяется только ток  $I$ , поэтому легко построить зависимость  $U_2$  от тока. Если ток будет равен нулю, что в данной цепи получаем при бесконечно большом сопротивлении  $R_2$  (режим холостого хода), то напряжение  $U_2$  будет равно ЭДС  $E$ . Если ток будет равен максимально возможному в данной цепи значению, равному  $I_{\max} = E/(R_1 + R_3)$ , что получаем при сопротивлении  $R_2$  равно нулю (режим короткого замыкания), то напряжение  $U_2$  будет равно нулю. Зависимость  $U_2$  от тока линейная, следовательно, график данной зависимости (рис. 1.5) можно построить по двум найденным значениям.

#### Задача 1.4.

Записать для заданной цепи (рис. 1.6) систему уравнений для расчета токов по методу токов ветвей.

#### Пример решения.

Число узлов цепи  $N_y = 3$ , число ветвей цепи  $N_B = 5$ , число ветвей цепи, содержащих источники тока,  $N_T = 1$ . Число неизвестных токов  $N_{HT} = N_B - N_T = 4$ . Следовательно, система уравнений по законам Кирхгофа должна содержать четыре независимых уравнения относительно токов ветвей. По первому закону Кирхгофа число уравнений равно  $N_y - 1$ , следовательно, двум. По второму закону Кирхгофа число уравнений равно  $N_B - N_y + 1 = N_T$ , следовательно, также двум.

Задаем произвольно положительные направления токов ветвей. Токи, направленные от узла, будем учитывать со знаком плюс, а токи, направленные к узлу, — со знаком минус. Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = J \\ I_2 - I_3 + I_4 = 0 \\ -R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 - E_1 \\ -R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_4 - E_2 \end{cases}$$

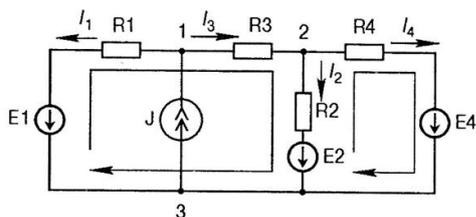


Рис. 1.6.

#### Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

#### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

#### Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №2

#### Методы анализа цепей постоянного тока

#### Цель занятия:

Приобрести навыки анализа электрических цепей методом узловых потенциалов и методом контурных токов

#### Задание:

### Задача 2.1.

Рассчитать токи ветвей в цепи (рис. 2.1) методом узловых потенциалов.

Пример решения. Примем потенциал  $V_3 = 0$  (базисный узел).

Система уравнений для определения потенциалов (узловых напряжений) узлов 1 и 2 будет иметь вид:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)V_1 - \frac{1}{R_3}V_2 = J - \frac{E_1}{R_1}; \\ -\frac{1}{R_3}V_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right)V_2 = \frac{E_4}{R_4} - \frac{E_2}{R_2}. \end{cases}$$

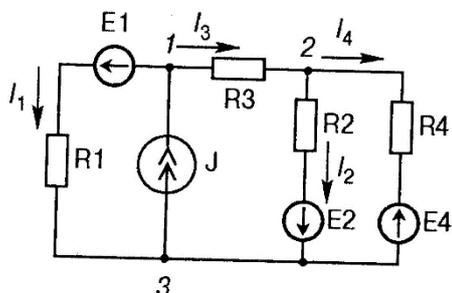


Рис. 2.1.

Решив данную систему уравнений, определим потенциалы узлов 1 и 2:  $V_1$  и  $V_2$ . Затем, зная значения потенциалов узлов, по закону Ома для участка цепи определим токи ветвей схемы:

$$\begin{cases} I_1 = (V_1 + E_1)/R_1; \\ I_2 = (V_2 + E_2)/R_2; \\ I_3 = (V_1 + V_2)/R_3; \\ I_4 = (V_2 + E_4)/R_4. \end{cases}$$

### Задача 2.2.

Рассчитать токи ветвей в цепи на рис. 2.2 методом контурных токов.

Пример решения.

Ток источника тока замкнем через ветвь с  $E_1$  и  $R_1$ . В качестве независимых контурных токов выберем токи  $I_{k1}$  и  $I_{k2}$  как показано на рис. 2.2.

Система уравнений относительно данных контурных токов будет иметь вид:

$$\begin{cases} (R_1 + R_2 + R_3)I_{k1} - R_2I_{k2} = E_2 - E_1 + R_1J; \\ -R_2I_{k1} + (R_2 + R_4)I_{k2} = -E_2 - E_4. \end{cases}$$

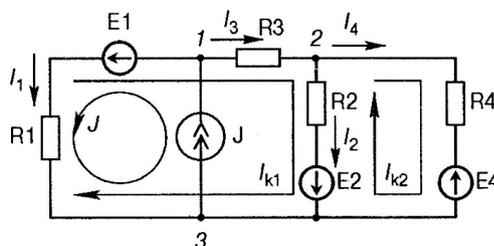


Рис. 2.2

Решив данную систему уравнений, определим контурные токи  $I_{k1}$  и  $I_{k2}$ . Затем рассчитываем токи ветвей схемы как алгебраическую сумму контурных токов ( $I_{k1}$ ,  $I_{k2}$ ,  $J$ ) соответственно в каждой ветви:

$$I_1 = J - I_{k1}; \quad I_2 = I_{k1} - I_{k2}; \quad I_3 = I_{k1}; \quad I_4 = I_{k2}.$$

Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №3

#### **Баланс мощности и потенциальная диаграмма**

Цель занятия:

Приобрести навыки составления баланса мощности и построения потенциальной диаграммы для замкнутого контура.

Задание:

Задача 3.1.

Для схемы, приведенной на рис 3.1, составить баланс мощности.

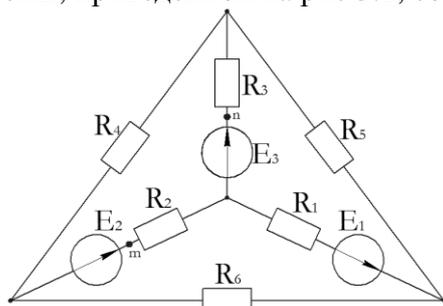


Рис.3.1.

Пример решения.

$$\sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{k=1}^m R_k I_k^2;$$

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6;$$

Задача 3.2.

Для контура, представленного на рис.3.2, построить потенциальную диаграмму.

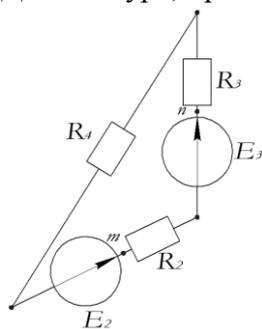


Рис.3.2

Пример решения.

$$\varphi_2 = 0;$$

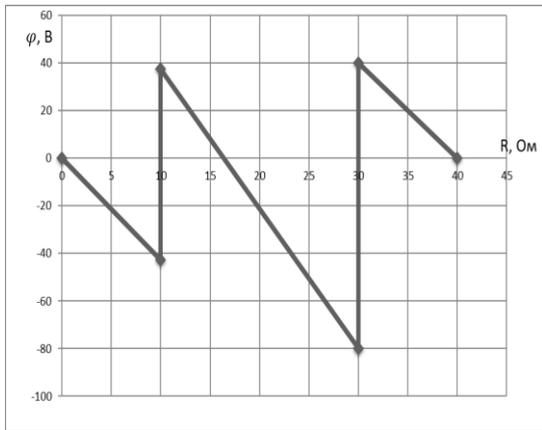
$$\varphi_n = \varphi_2 - I_3 R_3 = -4.26 \cdot 10 = -42.6;$$

$$\varphi_4 = \varphi_n + E_3 = -42.6 + 80 = 37.4;$$

$$\varphi_m = \varphi_4 - I_2 R_2 = 37.4 - 5.87 \cdot 20 = -80;$$

$$\varphi_1 = \varphi_m + E_2 = -80 + 120 = 40;$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + I_4 R_4 = 40 - 40 = 0;$$



Форма отчетности:

Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

**Практическое занятие №4**

**Тестирование по теме «Основные законы и общие методы анализа электрических цепей»**

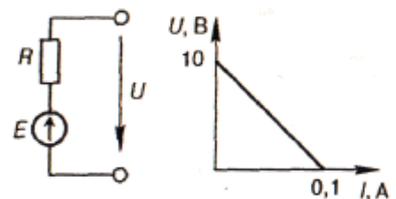
Цель занятия:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Основные законы и общие методы анализа электрических цепей»

Тестовые задания по теме «Основные законы и общие методы анализа электрических цепей»

ТЗ № 1 Внутреннее сопротивление источника напряжения в омах равно \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



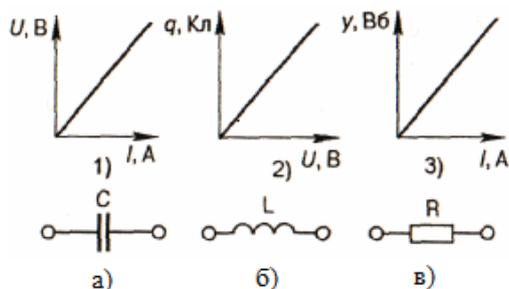
ТЗ № 2 Для емкостного элемента справедливо равенство:

(НТ 1)

а)  $u = C \frac{di}{dt}$ ; б)  $u = \frac{1}{C} \int idt$ ; в)  $u = Ci$ ; г)  $i = C \frac{du}{dt}$ ; д)  $i = \frac{1}{C} \int udt$ .

ТЗ № 3 Соответствие элементов электрической цепи и их характеристик:

(НТ 2)

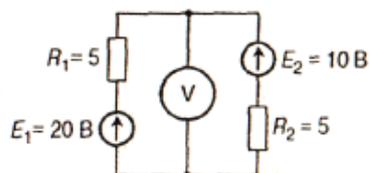


ТЗ № 4 Закон Ома имеет вид:

(НТ 1) а)  $u = \frac{i}{R}$ ; б)  $u = i/C$ ; в)  $u = i/L$ ; г)  $u = Ri$ ; д)  $u = Ci$ ; е)  $u = Li$ .

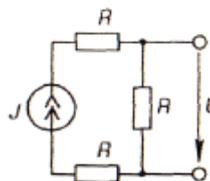
ТЗ № 5 Идеальный вольтметр покажет напряжение в вольтах, равное \_\_\_\_.

(НТ 1)



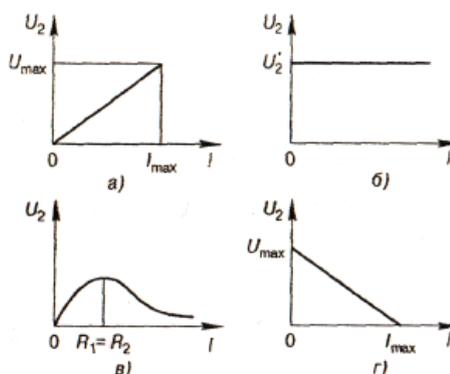
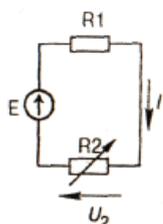
ТЗ № 6 Напряжение  $U$  в цепи равно:

(НТ 1) а)  $R/J$ ; б)  $JR/(3R)$ ; в)  $RJ$ ; г)  $J/R$ .



ТЗ № 7 Зависимость напряжения  $U_2$  от тока цепи, который изменяется с изменением  $R_2$ :

(НТ 2)



ТЗ № 8 Закон Кирхгофа для напряжений:

(НТ 1) а) сумма напряжений на всех участках электрической цепи равна сумме ЭДС цепи;

б) сумма напряжений ветвей в контуре электрической цепи равна сумме ЭДС в контуре;

в) алгебраическая сумма напряжений в любом контуре электрической цепи равна нулю;

г) алгебраическая сумма напряжений на всех участках электрической цепи равна нулю.

ТЗ № 9 Уравнение по закону Кирхгофа для напряжений для первого контура:

(НТ 1)

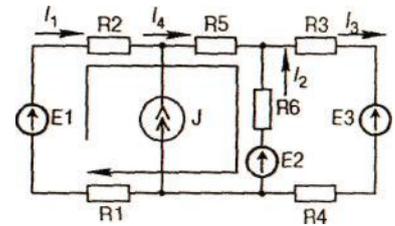
а)  $R_2 I_1 + R_5 I_4 + R_6 I_2 = E_1 + E_2$ ;

б)  $(R_1 + R_2) I_1 + R_5 I_4 - R_6 I_2 = E_1 - E_2$ ;

в)  $(R_1 + R_2) I_1 + R_5 I_4 + R_6 I_2 = E_1 + E_2$ ;

г)  $(R_1 + R_1) I_1 + R_5 I_4 - R_6 I_2 + (R_5 + R_6) J = E_1 - E_2$ ;

д)  $(R_1 + R_1) I_1 + R_5 I_4 - R_6 I_2 - (R_1 + R_2) J = E_1 - E_2$ .

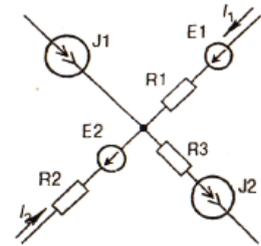


ТЗ № 10 Уравнение по первому закону Кирхгофа для фрагмента цепи может быть записано в виде:

(НТ 1)

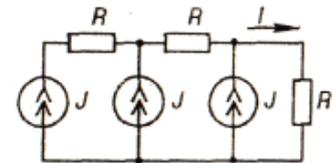
а)  $I_1 + I_2 + J_2 + J_1 = 0$ ; б)  $-I_1 - I_2 - J_1 + J_2 = 0$ ; в)  $I_1 + I_2 = J_2 - J_1$ ;

г)  $I_1 + I_2 = -J_1 - J_2 + E_1/R_1 - E_2/R_2$ ; д)  $I_1 + I_2 = J_1 + J_2 + E_1/R_1 + E_2/R_2$ .



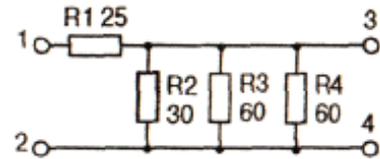
ТЗ № 11 Ток  $I$  в амперах по законам Кирхгофа при  $J=2A$ ,  $R=10$  Ом равен \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



ТЗ № 12 Сопротивление схемы относительно точек 3,4 в омах равно \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



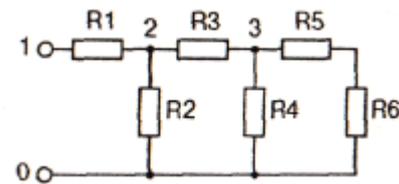
ТЗ № 13 Последовательность расчета входного сопротивления цепи:

(НТ 1)

1) рассчитать эквивалентное сопротивление относительно точек 1-0;

2) рассчитать эквивалентное сопротивление относительно точек 2-0;

3) рассчитать эквивалентное сопротивление относительно точек 3-0.

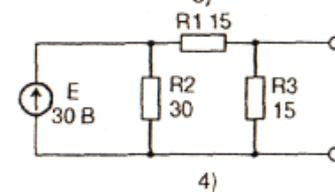
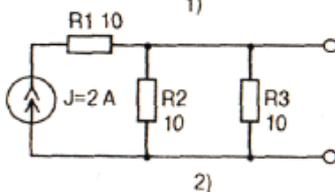
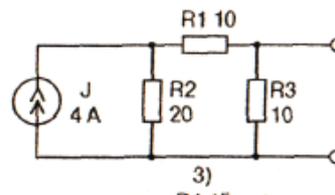
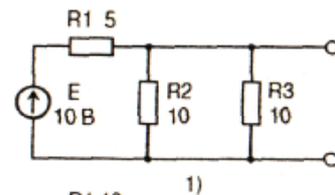


ТЗ № 14 Соответствие схемы и значений напряжения на ее выходе:

(НТ 3)

а) 5 В;

б) 15 В; в) 20 В.



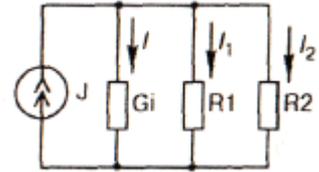
ТЗ № 15 Баланс мощностей для цепи:

(НТ 1)

а) 
$$J^2 G_i = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \frac{I^2}{G_i};$$

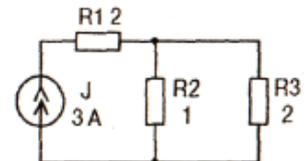
б) 
$$J \frac{I}{G_i} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I^2 G_i;$$

в) 
$$J \frac{I}{G_i} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \frac{I^2}{G_i};$$
 г) 
$$\frac{J^2}{G_i} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2;$$
 д) 
$$J \frac{I}{G_i} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 - \frac{I^2}{G_i}.$$



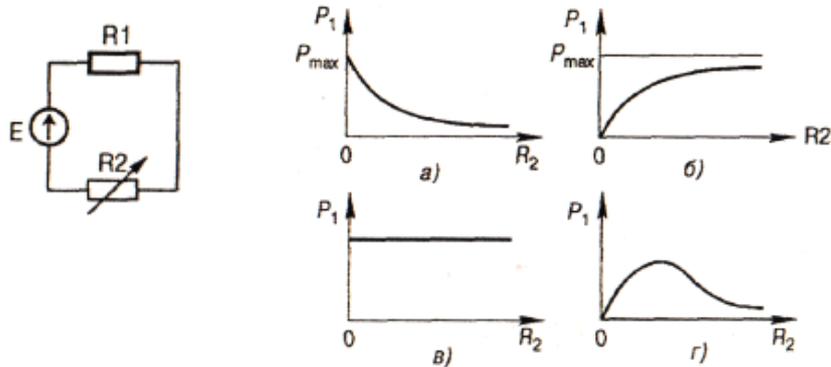
ТЗ № 16 Мощность в сопротивлении  $R_2$  в ваттах равна \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



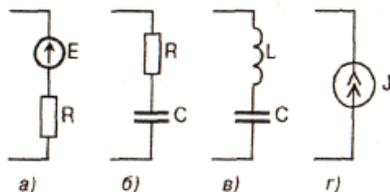
ТЗ № 17 Зависимость мощности в  $R_1$  от сопротивления  $R_2$ , если  $E = \text{const}$ :

(НТ 2)



ТЗ № 18 К активным двухполюсникам относятся:

(НТ 1)

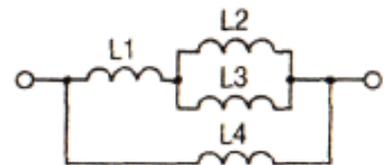


ТЗ № 19 Эквивалентная индуктивность двухполюсника:

(НТ 2)

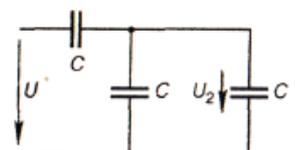
а) 
$$\frac{(L_2 + L_3 + L_4)L_1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4};$$
 б) 
$$L_1 + \frac{(L_2 L_3 L_4)}{L_2 + L_3 + L_4};$$

в) 
$$L_4 + \frac{L_1(L_2 + L_3)}{L_1 + L_2 + L_3};$$
 г) 
$$\frac{L_4 \left[ L_1 + \frac{L_2 L_3}{L_2 + L_3} \right]}{L_1 + L_4 + \frac{L_2 L_3}{L_2 + L_3}};$$



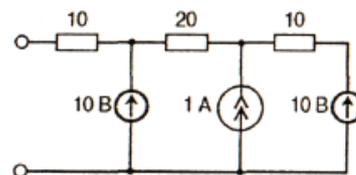
ТЗ № 20 Напряжение  $U_2$  в вольтах при  $U=60$  В и  $C=20$  мкФ равно \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



ТЗ № 21 ЭДС эквивалентного источника в вольтах равна \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



ТЗ № 22 Параметры эквивалентного источника напряжения относительно ветви с  $R_3$ :

(НТ 2)

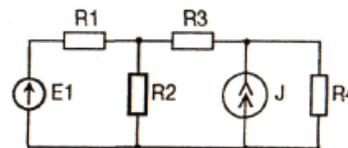
а)  $E_{\text{э}} = E_1 + JR_4$ ;  $R_{\text{э}} = R_4 + R_2$ ;

б)  $E_{\text{э}} = \frac{E_1}{R_1 + R_2} R_2 - JR_4$ ;  $R_{\text{э}} = R_4 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ;

в)  $E_{\text{э}} = \frac{E_1}{R_1 + R_2} R_2 + JR_4$ ;  $R_{\text{э}} = R_4 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ;

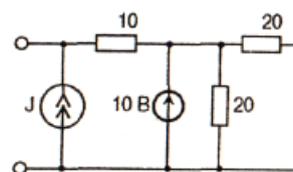
г)  $E_{\text{э}} = JR_4 - \frac{E_1}{R_1 + R_2} R_2$ ;  $R_{\text{э}} = R_4 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ;

д)  $E_{\text{э}} = \frac{E_1}{R_1 + R_2} R_2 + E_1 - JR_4$ ;  $R_{\text{э}} = R_1 + R_2 + R_4$ .



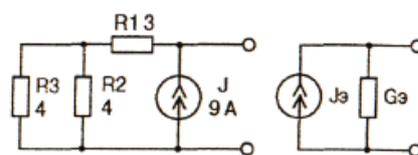
ТЗ № 23 Внутреннее сопротивление эквивалентного источника в омах равно \_\_\_\_\_.

(НТ 2)



ТЗ № 24 Внутренняя проводимость эквивалентного источника тока в сименсах равна \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



ТЗ № 25 При расчете методом наложения число частичных (вспомогательных) схем равно:

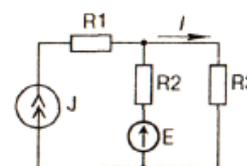
(НТ 1)

- а) числу независимых источников напряжения;
- б) числу независимых источников тока;
- в) числу независимых источников напряжения и тока;
- г) числу резистивных сопротивлений в схеме;
- д) числу зависимых и независимых источников.

ТЗ № 26 Ток  $I$ , записанный по методу наложения, равен:

(НТ 2)

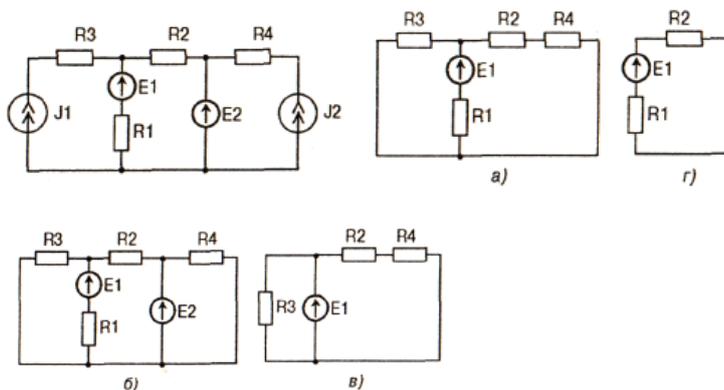
а)  $I = J \frac{R_2}{R_2 + R_3} + \frac{E}{R_2 + R_3}$ ; б)  $I = J \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_3} + \frac{E}{R_2 + R_3}$ ;



$$I = J \frac{R_3}{R_1 + R_3} + \frac{E}{R_2 + R_3}; \quad I = J \frac{R_3}{R_1 + R_3} + \frac{E}{R_3}.$$

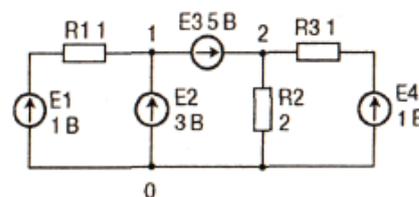
ТЗ № 27 Вспомогательная (частичная) схема для источника  $E_1$  при расчете методом наложения:

(НТ 2)



ТЗ № 28 Потенциал узла 2 в вольтах при  $V_0=0$  равен \_\_\_\_\_.

(НТ 2)



ТЗ № 29 Уравнение для узла 2 по методу узловых потенциалов при  $V_0=0$ :

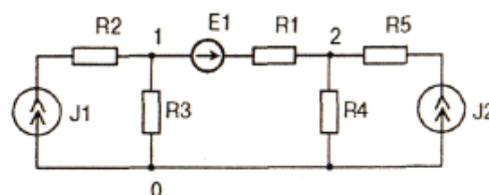
(НТ 2)

а)  $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4}\right)V_2 - \frac{1}{R_1}V_1 = J_2 + \frac{E_1}{R_1};$

б)  $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right)V_2 - \frac{1}{R_1}V_1 = J_2 + \frac{E_1}{R_1};$

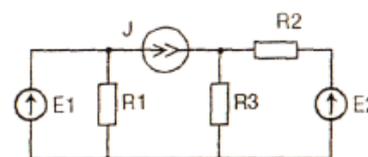
в)  $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4}\right)V_2 + \frac{1}{R_1}V_1 = J_2 + \frac{E_1}{R_1};$

г)  $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right)V_2 + \frac{1}{R_1}V_1 = J_2 + \frac{E_1}{R_1};$



ТЗ № 30 Число уравнений по методу контурных токов для схемы равно \_\_\_\_\_.

(НТ 2)



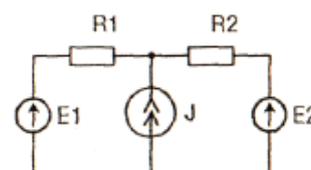
ТЗ № 31 Уравнение по методу контурных токов для цепи:

(НТ 2)

а)  $(R_1+R_2)I_k=E_1+E_2+R_1J;$

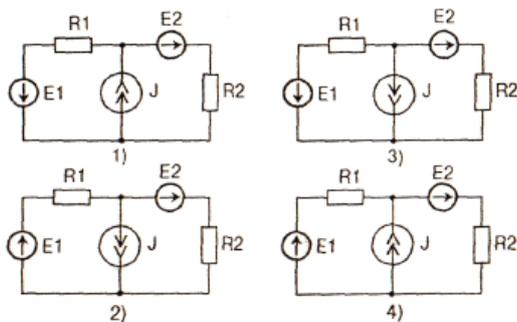
б)  $(R_1+R_2)I_k=E_1-E_2+R_1J;$

в)  $(R_1+R_2)I_k=E_1-E_2-R_1J;$  г)  $(R_1+R_2)I_k=E_1+R_1J.$



ТЗ № 32 Соответствие схемы и уравнения по методу контурных токов:

(НТ 3)



а)  $(R_1+R_2)I_k=E_1+E_2-R_2J$ ; в)  $(R_1+R_2)I_k=-E_1+E_2-R_2J$ ;

б)  $(R_1+R_2)I_k=E_1+E_2+R_2J$ ; г)  $(R_1+R_2)I_k=-E_1+E_2+R_2J$ .

Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №5

**Понятие о методе комплексных амплитуд.**

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета цепей синусоидального тока методом комплексных амплитуд.

Задание:

Задача 5.1.

Рассчитать значение полного сопротивления цепи (рис. 5.1) при подаче на ее вход напряжения

$$u(t) = 10 \cos(10^3 t - \pi/3).$$

Пример решения.

Эквивалентная символическая схема цепи приведена на рис. 5.2.

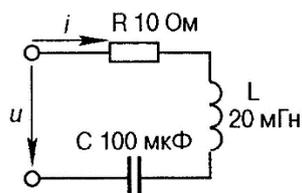


Рис. 5.1.

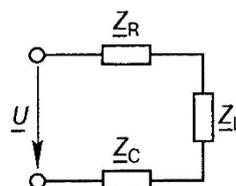


Рис. 5.2.

Частота входного напряжения  $\omega = 10^3 \text{ c}^{-1}$ .

Комплексное сопротивление схемы, Ом,

$$\underline{Z}_{cx} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 10 + j\left(10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} - \frac{1}{10^3 \cdot 10^{-4}}\right) = 10 + j10.$$

Полное сопротивление цепи, Ом, будет равно модулю ее комплексного сопротивления:

$$Z_{cx} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \sqrt{10^2 + 10^2} = 10\sqrt{2} = 14,14.$$

**Задача 5.2.** Определить значение тока в цепи (рис. 5.3), если  $R = 1$  Ом,  $C = 10^{-6}$  Ф и  $u(t) = 10\sqrt{2} \cos(10^6 t - \pi/2)$  В.

**Пример решения.** Емкостное сопротивление

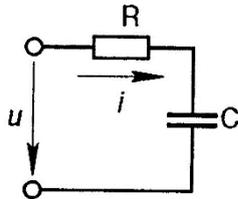


Рис. 5.3.

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{10^6 \cdot 10^{-6}} = -1 \text{ Ом.}$$

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = R + jX = 1 - j1 = \sqrt{2}e^{-j\pi/4} \text{ Ом.}$$

Комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{10\sqrt{2}e^{-j\pi/2}}{\sqrt{2}e^{-j\pi/4}} = 10e^{-j\pi/4}, \text{ А.}$$

Мгновенное значение тока  $i(t) = 10 \cos(10^6 t - \pi/4)$ , А.

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №6

#### **Энергетические соотношения в простейших цепях при гармоническом воздействии**

Цель занятия:

Приобрести навыки составления баланса мощности в цепях синусоидального тока.

Задание:

Задача 6.1.

Проверить баланс активных и реактивных мощностей в цепи, приведенной на рис. 6.1., если значение тока в ней

$$i(t) = 2 \cos(10^3 t - \pi/6), \text{ А.}$$

Пример решения.

Чтобы рассчитать мощность источника напряжения, необходимо определить мгновенное или комплексное значение входного напряжения или найти действующее значение напряжения на входе цепи и угол сдвига между входным напряжением и входным током.

Комплексное входное сопротивление цепи, Ом,

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{cx} &= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 10 + j\left(10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} - \frac{1}{10^3 \cdot 10^{-4}}\right) = 10 + j10 \\ &= 10\sqrt{2}e^{j\pi/4}. \end{aligned}$$

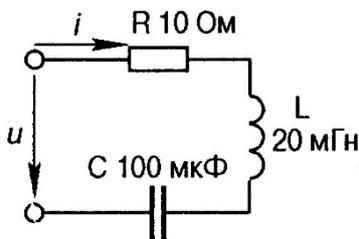


Рис. 6.1.

Фаза (аргумент) комплексного входного сопротивления цепи  $\varphi_{\text{вх}} = \pi/4$  показывает угол сдвига между входным током и входным напряжением.

Действующее значение напряжения на входе цепи  $U = Z_{\text{сх}} I = 10\sqrt{2}\sqrt{2} = 20 \text{ В}$ .

Активная мощность источника  $P_{\text{ист}} = UI \cos \varphi_{\text{вх}} = 20\sqrt{2} \cos(\pi/4) = 20\sqrt{2}\sqrt{2}/2 = 20$

Вт.

Реактивная мощность источника

$$Q_{\text{ист}} = UI \sin \varphi_{\text{вх}} = 20\sqrt{2} \times \sin(\pi/4) = 20\sqrt{2} \frac{\sqrt{2}}{2} = 20 \text{ ВАр}$$

Активная мощность, рассеиваемая в цепи,  $P_{\text{потр}} = I^2 R = (\sqrt{2})^2 \cdot 10 = 20 \text{ Вт}$ .

Реактивная мощность в цепи  $Q_{\text{потр}} = I^2(\omega L - 1/\omega C) = (\sqrt{2})^2(20 - 10) = 20 \text{ ВАр}$ .

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ист}} &= P_{\text{потр}} \\ Q_{\text{ист}} &= Q_{\text{потр}} \end{aligned} \right\} \text{баланс мощностей выполняется.}$$

Комплексная мощность цепи  $\underline{S} = P + jQ = 20 + j20$ , ВА.

Полная мощность цепи  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 20\sqrt{2}$ , ВА.

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №7

#### Тестирование по теме «Режим гармонических колебаний»

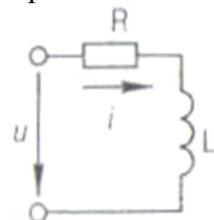
Цель занятия: Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Режим гармонических колебаний»

Тестовые задания по теме «Режим гармонических колебаний»

ТЗ № 1 (НТ 1) Гармонический ток через индуктивность при нулевой начальной фазе приложенного напряжения имеет фазу в градусах равную \_\_\_\_\_.

ТЗ № 2 (НТ 2) Напряжение на входе схемы, если  $i(t) = I_m \cos \omega t$ , будет равно:

- а)  $u = (R + \omega_1 L) I_m \cos(\omega_1 t - \text{arctg} \frac{\omega_1 L}{R})$  ;
- б)  $u = (R + \omega_1 L) I_m \cos(\omega_1 t + \text{arctg} \frac{\omega_1 L}{R})$  ;
- в)  $u = \sqrt{(R^2 + (\omega_1 L)^2)} I_m \cos(\omega_1 t - \text{arctg} \frac{\omega_1 L}{R})$  ;

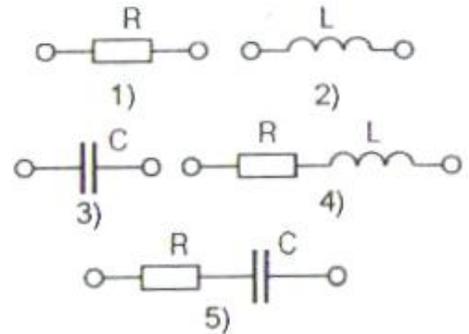


$$u = \sqrt{(R^2 + (\omega_1 L)^2)} I_m \cos(\omega_1 t + \operatorname{arctg} \frac{\omega_1 L}{R})$$

ТЗ № 3  
(НТ 3)

Соответствие схемы и записей тока в не, если приложенное напряжение  $u(t) = U_m \cos(\omega_1 t)$ :

- а)  $i = I_m \cos(\omega_1 t + \varphi) \varphi > 0$ ;  
 б)  $i = I_m \cos(\omega_1 t - \varphi) \varphi > 0$ ;  
 в)  $i = I_m \cos(\omega_1 t)$ ;  
 г)  $i = I_m \cos(\omega_1 t + \pi/2)$ ;  
 д)  $i = I_m \cos(\omega_1 t - \pi/2)$ .



ТЗ № 4  
(НТ 1)

Для тока  $i = 20\sqrt{2}e^{j\pi/6}$  ток  $I$  равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 5  
(НТ 1)

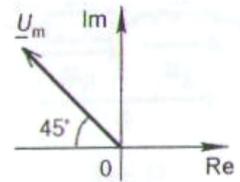
Мгновенное значение гармонического тока, А, если  $I_m = 2A$  равно:

- а)  $2\cos(\omega t)$ ; б)  $2A$  в)  $2\sqrt{2}\cos(\omega t)$ ; г)  $2/\sqrt{2}\cos(\omega t)$ .

ТЗ № 6  
(НТ 1)

Мгновенное значение напряжения, изображенного на комплексной плоскости, может быть записано как:

- а)  $u(t) = U_m \cos(\omega t - 45^\circ)$ ; б)  $u(t) = U_m \cos(\omega t - 225^\circ)$ ;  
 в)  $u(t) = U_m \cos(\omega t + 45^\circ)$ ; г)  $u(t) = U_m \cos(\omega t + 135^\circ)$ .



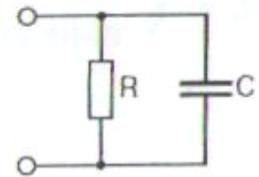
ТЗ № 7  
(НТ 2)

Амплитудное значение гармонического тока в амперах, если  $I_m = 3 + j4A$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 8  
(НТ 1)

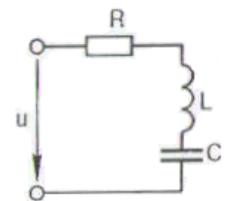
Комплексная проводимость схемы может быть записана как:

- а)  $(1 + j\omega CR)/R$ ; б)  $1/R - j/\omega$ ; в)  $1/R + j\omega C$ ;  
 г)  $1/(R + j\omega C)$ ; д)  $R + 1/j\omega C$ ;



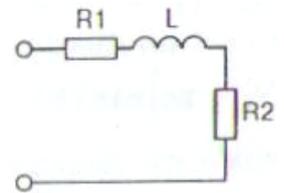
ТЗ № 9  
(НТ 1)

Полное сопротивление схемы в омах, если  $R = 30 \text{ Ом}$ ,  $\omega L = 20 \text{ Ом}$ ,  $1/\omega C = 60 \text{ Ом}$  равно \_\_\_\_\_.



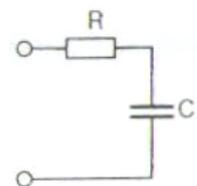
ТЗ № 10  
(НТ 1)

Модуль комплексного сопротивления цепи равен \_\_\_\_\_.

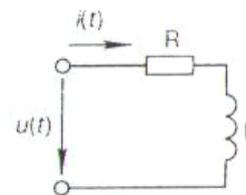


ТЗ № 11  
(НТ 1)

Аргумент комплексного сопротивления цепи равен \_\_\_\_\_.

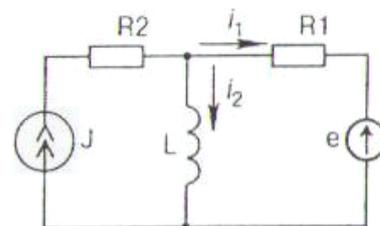


ТЗ № 12 (НТ 2) Амплитудное значение тока в амперах при  $R=10\text{ Ом}$ ,  $L=10^{-6}\text{ Гн}$ ,  $u(t)=30\sqrt{2}\cos(10^6t+\pi/6)\text{ В}$  равно \_\_\_\_\_.



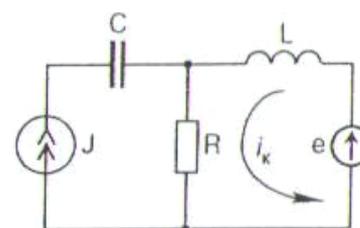
ТЗ № 13 (НТ 2) Уравнение по второму закону Кирхгофа для цепи может быть записано в виде:

- а)  $R_1 I_1 - \omega L I_2 = -E$ ;
- б)  $R_1 I_1 - j\omega L I_2 = -E$ ;
- в)  $R_1 I_{m1} - j\omega L I_{m2} = -E_m$ ;
- г)  $R_1 i_1 - L \frac{di_2}{dt} = -E$ ;
- д)  $R_1 I_1 - j\omega L I_2 = -E$ .



ТЗ № 14 (НТ 2) Уравнение по методу контурных токов для схемы может быть записано в виде:

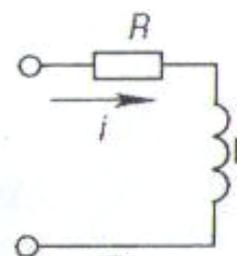
- а)  $(R + j\omega L) I_K = E + R J$ ;
- а)  $(R + j\omega L) I_{mk} = E_m - R J_m$ ;
- а)  $(R + j\omega L) I_K = E - J / j\omega C$ ;
- а)  $(R + j\omega L) I_K = E - R J$ .



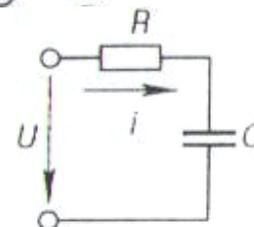
ТЗ № 15 (НТ 1) Полная мощность в цепи в общем случае может быть записана в виде:

- а)  $S = P + Q$ ; б)  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ; в)  $S = UI \cos \varphi$ ; г)  $S = I^2 R + I^2 X$ ; д)  $S = UI$ .

ТЗ № 16 (НТ 1) Реактивная мощность в варах, потребляемая индуктивным элементом  $L=10^{-6}\text{ Гн}$  при  $i(t)=6\cos(10^6t)\text{ А}$  равна \_\_\_\_\_.



ТЗ № 17 (НТ 1) Полная мощность в вольт-амперах при  $i(t)=\sin(\omega_1 t)\text{ А}$  и  $u(t)=40\sin(\omega_1 t - \pi/3)\text{ В}$  равна \_\_\_\_\_.



ТЗ № 18 (НТ 3) Соответствие между напряжением на входе в вольтах и активной мощностью, отдаваемой в цепь источником, в ваттах, если входной ток  $i(t)=\cos(\omega_1 t)\text{ А}$ :

- 1)  $u = 10\cos(\omega_1 t + \pi/2)$ ; 2)  $u = 10\cos(\omega_1 t)$ ; 3)  $u = 10\cos(\omega_1 t - \pi/4)$ ;
- 4)  $u = 10\cos(\omega_1 t + \pi/3)$ .
- а)  $P = 3,53$ ; б)  $P = 2,5$ ; в)  $P = 0$ ; г)  $P = 5$ .

Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая

линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

2. Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

## Практическое занятие №8

### Расчет частотных характеристик

Цель занятия:

Приобрести навыки расчета и построения частотных характеристик цепей первого и второго порядка

Задание:

Задача 8.1.

Записать комплексную передаточную функцию цепи (рис. 8.1.) по напряжению.

Эквивалентная символическая схема цепи приведена на рис. 8.2.

Пример решения.

Комплексная передаточная функция цепи по напряжению:  $H(j\omega) = \underline{U}_{m2} / \underline{U}_{m1} = \underline{U}_2 / \underline{U}_1$ .

В данной цепи протекает один ток  $I$ . Следовательно,

$$H(j\omega) = \frac{IZ_2}{I(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{R}{R + j\omega L}$$

Для любой цепи, эквивалентная символическая схема которой может быть сведена к виду (рис. 8.2), комплексная передаточная функция цепи по напряжению может быть записана через отношение комплексных сопротивлений:

$$H(j\omega) = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$

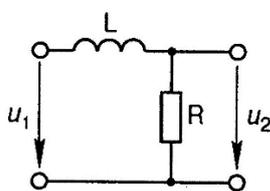
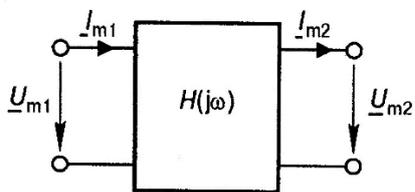


Рис. 8.1.

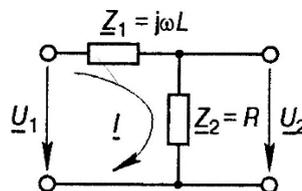


Рис.8.2.

Задача 8.2.

Определить и построить графики АЧХ и ФЧХ по напряжению цепи (рис. 8.3).

Пример решения.

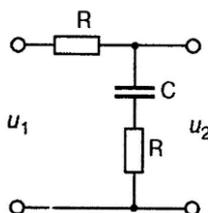
АЧХ является модулем, а ФЧХ — аргументом комплексной передаточной функции, которая может быть определена по формуле :

$$H(j\omega) = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{R + 1/j\omega C}{2R + 1/j\omega C} = \frac{1 + j\omega CR}{1 + j2\omega CR}$$

АЧХ цепи

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}{\sqrt{1 + (2\omega CR)^2}};$$

ФЧХ цепи



$$\varphi_H(\omega) = \operatorname{arctg}(\omega CR) - \operatorname{arctg}(2\omega CR).$$

При  $\omega = 0$   $H(\omega) = 1$  и  $\varphi_H(\omega) = 0$ , при  $\omega \rightarrow \infty$   $H(\omega) = 0,5$  и  $\varphi_H(\omega) = 0$ .

График АЧХ для цепей первого порядка в общем случае (без, задания численных значений элементов цепи) может быть построен по двум точкам. График АЧХ рассматриваемой цепи приведен на рис. 8.4.

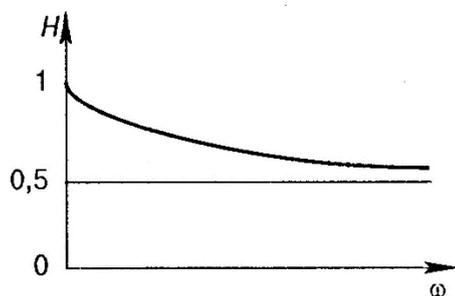


Рис. 8.4

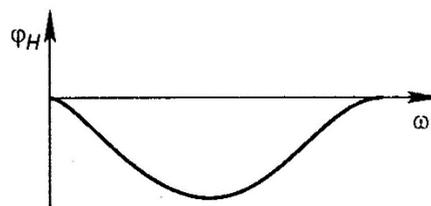


Рис. 8.5

Для построения графика ФЧХ необходимо определить, в области положительных или отрицательных значений будет располагаться функция  $\varphi_H(\omega)$ . Для цепей первого порядка кривая  $\varphi_H(\omega)$  не может пересекать ось ординат ( $\omega$ ). Так как  $\operatorname{arctg}(2\omega CR) < \operatorname{arctg}(\omega CR)$ , то кривая  $\varphi_H(\omega)$  будет располагаться в области отрицательных значений. График ФЧХ рассматриваемой цепи приведен на рис. 8.5.

Если необходимо для цепи построить графики АЧХ в общем случае, то для цепей первого порядка достаточно на основе анализа схемы получить значения АЧХ при  $\omega = 0, \omega \rightarrow \infty$  и по двум точкам построить график. ФЧХ для некоторых цепей также легко построить по двум точкам, а в случае отсутствия такой возможности достаточно проанализировать характер цепи на промежуточных частотах.

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с

### Практическое занятие №9

#### **Тестирование по теме «Частотные характеристики»**

Цель работы: Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Частотные характеристики»

Тестовые задания по теме «Частотные характеристики»

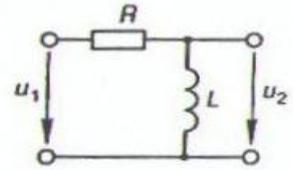
ТЗ № 1 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет вид:

(НТ 1) а)  $\operatorname{Re}(H(j\omega))$ ; б)  $\operatorname{Im}(H(j\omega))$ ; в)  $|H(j\omega)|$ ; г)  $\arg|H(j\omega)|$ .

ТЗ № 2  
(НТ 2)

АЧХ цепи по напряжению имеет вид:

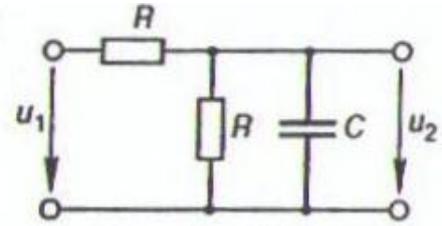
а)  $\frac{j\omega L}{R + j\omega L}$ ; б)  $\frac{\omega L}{R + \omega L}$ ; в)  $\frac{\omega L}{R}$ ; г)  $\frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ .



ТЗ № 3  
(НТ 2)

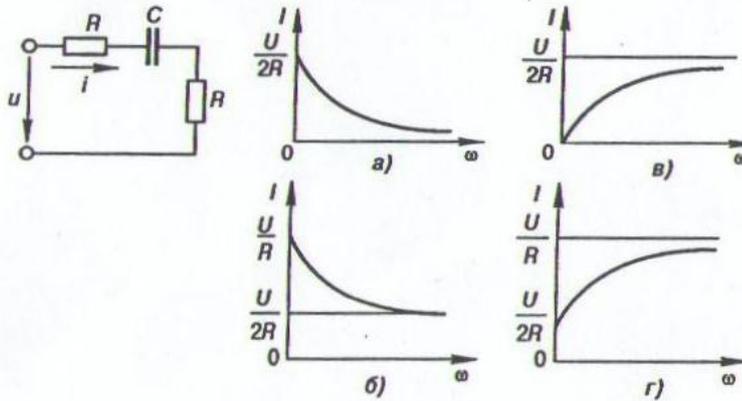
Комплексная передаточная функция цепи по напряжению имеет вид:

а)  $\frac{R/(1 + j\omega CR)}{R + R/(1 + j\omega CR)}$ ; б)  $\frac{1}{2R + \frac{1}{j\omega C}}$ ;  
в)  $\frac{R}{1 + j\omega CR}$ ; г)  $\frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{2R + \frac{1}{j\omega C}}$ ;



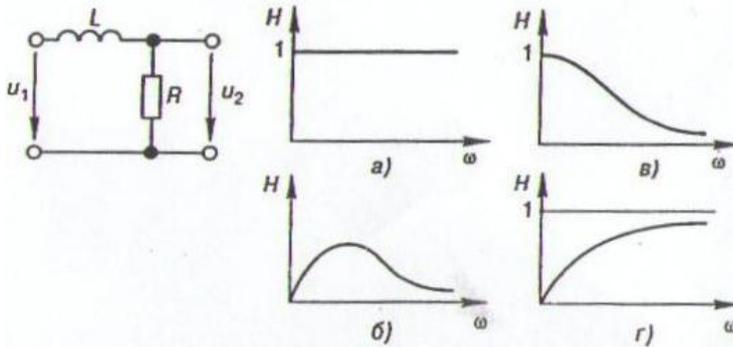
ТЗ № 4  
(НТ 2)

Зависимость модуля комплексного входа тока от частоты:



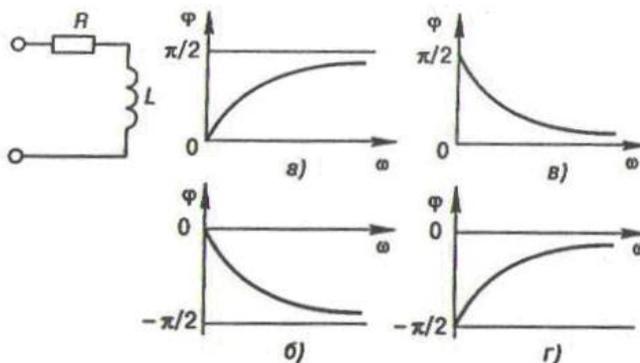
ТЗ № 5  
(НТ 2)

АЧХ по напряжению:



ТЗ № 6  
(НТ 2)

Зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты:

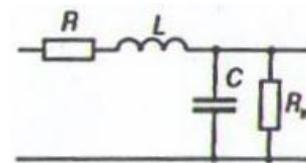


ТЗ № 7

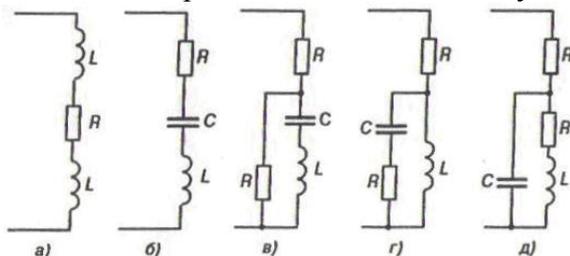
Добротность последовательного колебательного контура при увеличении

(НТ 1) индуктивности контура в 4 раза:  
 а) не изменится; б) увеличится в 4 раза; в) уменьшится в 4 раза;  
 г) увеличится в 2 раза; д) уменьшится в 2 раза.

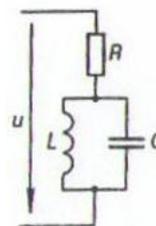
ТЗ № 8  
 (НТ 2) При увеличении сопротивления  $R_n$  :  
 а) добротность контура увеличивается;  
 б) добротность контура уменьшается;  
 в) полоса пропускания уменьшается;  
 г) полоса пропускания увеличивается;  
 д) избирательность контура уменьшается;  
 е) избирательность контура увеличивается.



ТЗ № 97  
 (НТ 2) Резонанс напряжений может возникнуть в цепях:



ТЗ № 10  
 (НТ 2) При резонансе токов в цепи:  
 а)  $I_C = I_L$ ; б)  $U_C = U$ ; в)  $I = 0$ ; г)  $I = U/R$ ; д)  $U_R = U$ .



Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с

### Практическое занятие №10

#### **Классический метод анализа переходных процессов**

Цель работы:

Приобрести навыки расчета переходных процессов в электрических цепях классическим методом.

Задание:

Задача 10.1.

Определить напряжение на емкости  $u_C(0_+)$  в первый момент после коммутации в цепи на рис. 10.1.

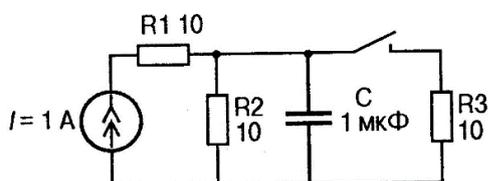


Рис.10.1.

Пример решения.

Рассмотрим цепь до коммутации. Ток источника тока  $I$  будет протекать через сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , через емкость постоянный ток равен нулю. Емкость  $C$  включена параллельно с сопротивлением  $R_2$ , следовательно, к ним приложено одно и тоже напряжение:  $u_C(0_-) = IR_2$ . В первый момент непосредственно после коммутации напряжение на емкости по закону коммутации скачком измениться не может, т.е. получаем

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(0) = IR_2 = 10 \text{ В.}$$

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с

**Практическое занятие №11**

**Переходные процессы в одиночном колебательном контуре**

Цель работы:

Приобрести навыки расчета переходных процессов в электрических цепях с одним реактивным элементом

Задание:

Задача 11.1.

В момент  $t = 0$  произошло замыкание ключа, определить изменение напряжения на выходе цепи (рис. 11.1) после коммутации  $u_2(t) = u_C(t)$ , если  $u_1(t) = U$  и  $u_2(0_-) = 0$ .

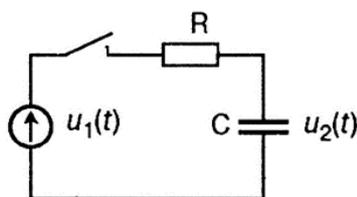


Рис.11.1.

Пример решения.

После коммутации по второму закону Кирхгофа получим уравнение

$$u_R + u_C = U.$$

Далее имеем

$$u_R = Ri_C = RC \frac{du_C}{dt},$$

где  $RC$  —  $\tau$ ,  $\tau$  — постоянная времени цепи. Получаем уравнение относительно выходного напряжения:

$$\tau \frac{du_2}{dt} + u_2 = U.$$

Это линейное неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение 1-го порядка с постоянными коэффициентами.

Решение этого уравнения равно сумме общего решения соответствующего однородного

уравнения  $\tau \frac{du_2}{dt} + u_2 = 0$  и частного решения неоднородного уравнения. Как известно из

математики, общее решение однородного уравнения с постоянными коэффициентами имеет вид  $Ae^{pt}$ , где  $A$  — произвольная постоянная, а  $p$  — корень характеристического уравнения  $tr + 1 = 0$ .

Характеристическое уравнение — алгебраическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению, где вместо производных взята переменная  $p$  в степени, определяемой порядком производных. Решая характеристическое уравнение, находим корень  $p_1 = -1/\tau$ . Общее решение будет иметь вид  $u_{2\text{св}} = Ae^{-t/\tau}$ .

Частное решение неоднородного уравнения, в правой части которого постоянная величина  $U$ , необходимо искать также в виде постоянной  $u_{2\text{вын}} = B$ . Подставляя в исходное уравнение  $du_2/dt = 0$ , легко показать, что  $B = U$ . Следовательно,  $u_2(t) = Ae^{-t/\tau} + U$ .

Определим произвольную постоянную  $A$  из начальных условий:  $u_2(0) = A + U = 0$ , т.е.  $A = -U$ , так как по закону коммутации  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$ . Тогда  $u_2(t) = U(1 - e^{-t/\tau})$ .

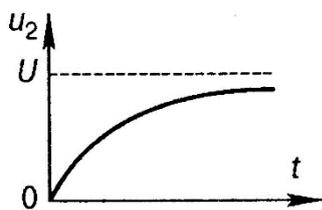


Рис. 11.2.

В графическом виде эта зависимость показана на рис. 11.2.

Ток в цепи  $i_C(t)$  легко найти:

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_2}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/\tau}.$$

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с

## Практическое занятие №12

### **Операторный метод анализа переходных процессов**

Цель работы:

Приобрести навыки расчета переходных процессов в электрических цепях операторным методом

Задание:

Задача 12.1.

Составить операторную схему замещения цепи на рис. 12.1, если  $U = const$ .

Пример решения.

Чтобы составить операторную схему замещения цепи, необходимо определить начальные условия переходного процесса. До коммутации ключ разомкнут, и схема представляет собой последовательное соединение резистивного сопротивления и емкости. Ток в цепи от источника постоянного напряжения будет равен нулю, и, следовательно, падение напряжения на резистивном сопротивлении  $u_R = Ri$  также будет равно нулю:  $u_R(0_-) = 0$ .

Тогда, исходя из закона Ома для одиночного контура  $u_R + u_C = U$ , напряжение на емкости до коммутации будет равно входному напряжению:

$$u_C(0_-) = U.$$

По закону коммутации

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = U.$$

Ненулевые начальные условия необходимо учесть в операторной схеме замещения путем включения в нее дополнительного (внутреннего) источника напряжения  ${}_c E(p) = u_C(0)/p$ .

Операторная схема замещения цепи приведена на рис. 12.2.

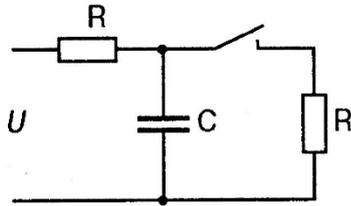


Рис. 12.1

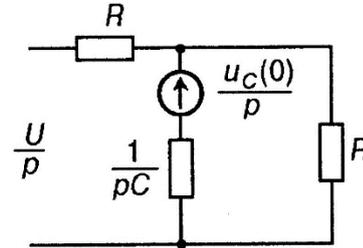


Рис. 12.2

Форма отчетности: Отчет не предусмотрен.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с

### Практическое занятие №13

**Тестирование по теме «Режим негармонических воздействий»**

Цель работы:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Режим негармонических воздействий»

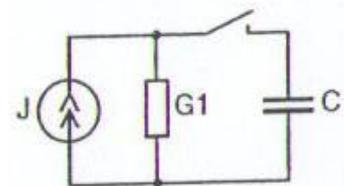
Тестовые задания по теме «Режим негармонических воздействий»

ТЗ №1 Законы коммутации имеют вид:

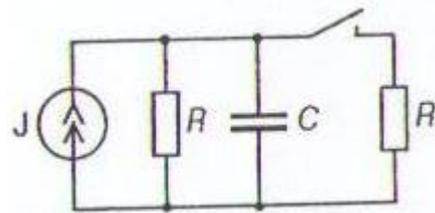
- (НТ 1) а)  $i_L(0_+) = i_L(0_-); u_L(0_+) = u_L(0_-);$   
 б)  $i_C(0_+) = i_C(0_-); u_C(0_+) = u_C(0_-);$   
 в)  $i_L(0_+) = i_L(0_-); u_C(0_+) = u_C(0_-);$   
 г)  $i_C(0_+) = i_C(0_-); u_L(0_+) = u_L(0_-).$

ТЗ №2 Начальные значения  $i_C(0_+)$  и  $u_C(0_+)$  после коммутации при  $J = \text{const}$  равны:

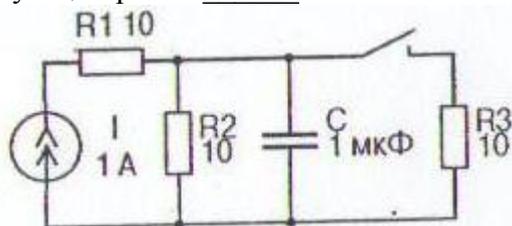
- (НТ 1) а)  $i_C(0_+) = J; u_C(0_+) = J/G_1;$   
 б)  $i_C(0_+) = 0; u_C(0_+) = 0;$   
 в)  $i_C(0_+) = 0; u_C(0_+) = J/G_1;$   
 г)  $i_C(0_+) = J; u_C(0_+) = 0.$



ТЗ №3 Начальное значение  $u_C(0_+)$  в вольтах после коммутации при  $J=1$  А,  $R=10$  Ом,  $C=10$  мкФ равно \_\_\_\_\_.  
(НТ 2)



ТЗ №4 Начальное значение для  $u_C$  в вольтах после коммутации равно \_\_\_\_\_.  
(НТ 2)

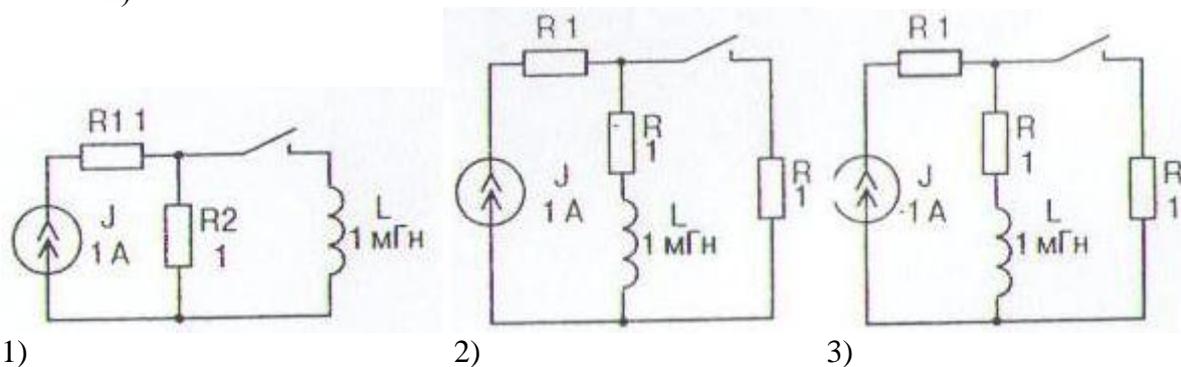


ТЗ №5 При расчёте переходного режима в цепи для искомой величины находят закон изменения:

- (НТ 1) а) амплитудного значения;  
б) мгновенного значения;  
в) свободной составляющей;  
г) действующего значения.

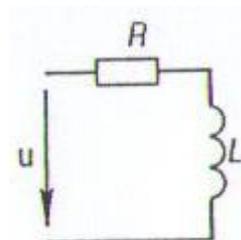
ТЗ №6 Соответствие схемы и начального значения  $i_L$  после коммутации:

- (НТ 3) а)  $i_L(0) = 0,5$  А;  
б)  $i_L(0) = 1$  А;  
в)  $i_L(0) = 0$  А.



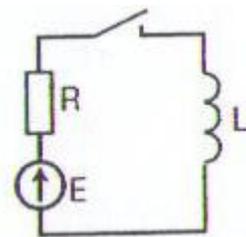
ТЗ №7 Дифференциальное уравнение для цепи имеет вид:

- (НТ 1) а)  $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{u(t)}{L}$ ;  
б)  $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = u(t)$ ;  
в)  $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{du(t)}{dt}$ ;  
г)  $\frac{di}{dt} + \frac{L}{R}i = \frac{du(t)}{dt}$ .



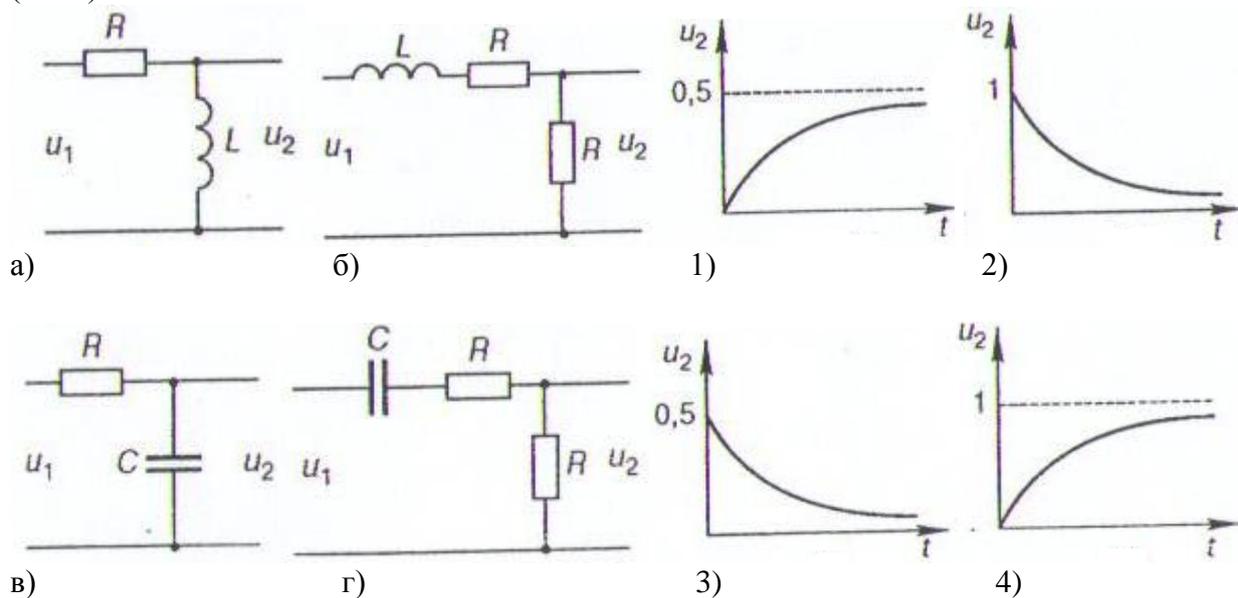
ТЗ №8 Установившееся значение тока цепи после коммутации при  $E=\text{const}$ :

- (НТ 2) а)  $E/(R + \omega L)$ ;  
 б)  $E/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ;  
 в)  $E/R$ ;  
 г) 0.



ТЗ №9 Соответствие схемы и графика напряжения на её выходе, если на вход в момент времени  $t=0$  подаётся постоянное напряжение 1 В.

(НТ 3)

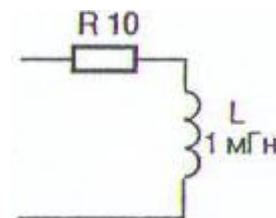


ТЗ №10 Переходная характеристика цепи численно равна отклику цепи на воздействие на её входе:

- (НТ 1) а) гармонической функции;  
 б) единичной функции;  
 в) экспоненциальной функции;  
 г) импульсной функции (функции Дирака).

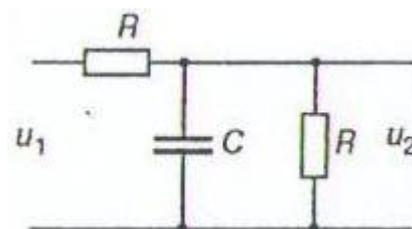
ТЗ №11 Постоянная времени цепи в микросекундах равна \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



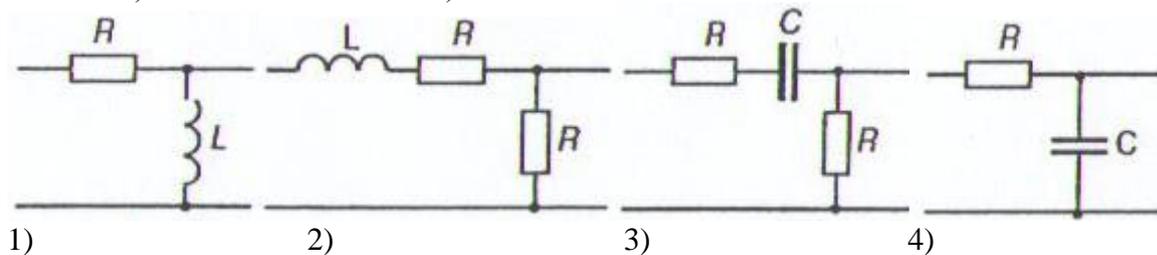
ТЗ №12 Переходная характеристика цепи по напряжению:

- (НТ 2) а)  $g(t) = e^{-t/\tau}$ ;  
 б)  $g(t) = 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 в)  $g(t) = 0,5 - 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 г)  $g(t) = 1 - e^{-t/\tau}$ .



ТЗ №13 Соответствие цепи и её переходной характеристики по напряжению:

- (НТ 3) а)  $g(t) = 1 - e^{-t/\tau}$ ; б)  $g(t) = 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 в)  $g(t) = 0,5 - 0,5e^{-t/\tau}$ ; г)  $g(t) = e^{-t/\tau}$ .



ТЗ №14 Интеграл Дюамеля, если  $f_1(t)$  - воздействие,  $f_2(t)$  - реакция,  $g(t)$  - переходная характеристика цепи, может иметь вид:

(НТ 2) а) 
$$f_2(t) = f_1(0)g(t) + \int_0^t f_1'(\tau)g(t-\tau)d\tau;$$

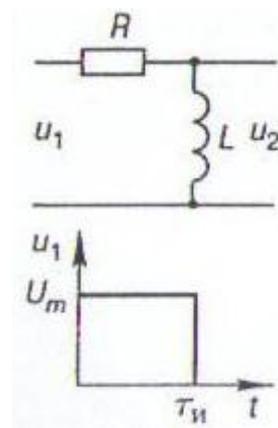
б) 
$$f_2(t) = f_1(0)g(t) + \int_0^t f_1'(\tau)g(\tau)d\tau;$$

в) 
$$f_2(t) = f_1(t)g(t) + \int_0^t f_1'(\tau)g(t-\tau)d\tau;$$

г) 
$$f_2(t) = f_1(0)g(t) + \int_0^t f_1'(t-\tau)g(\tau)d\tau.$$

ТЗ №15 Интеграл Дюамеля для вычисления напряжения на выходе цепи при подаче на её вход заданного сигнала будет равен:

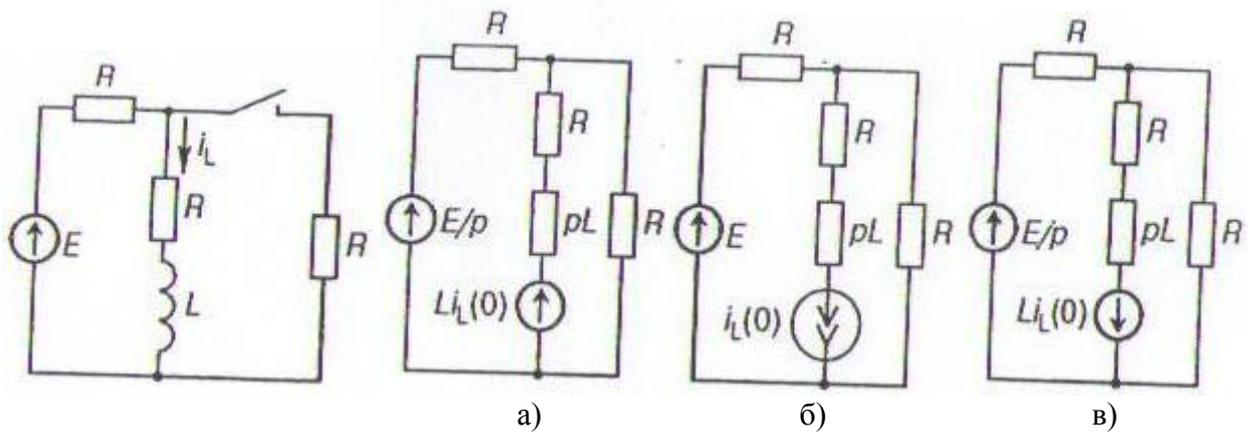
- (НТ 3) а)  $u_2(t) = U_m e^{t/\tau} + U_m e^{-t/\tau}$ ;  
 б)  $u_2(t) = U_m e^{-t/\tau} \sigma(t) - U_m e^{-(t-t_{\dot{E}})/\tau} \sigma(t-t_{\dot{E}})$ ;  
 в)  $u_2(t) = U_m e^{-t/\tau} \sigma(t) + U_m e^{-t/\tau} \sigma(t-t_{\dot{E}})$ ;  
 г)  $u_2(t) = U_m e^{t/\tau} \sigma(t) - U_m e^{-(t-t_{\dot{E}})/\tau} \sigma(t-t_{\dot{E}})$ .



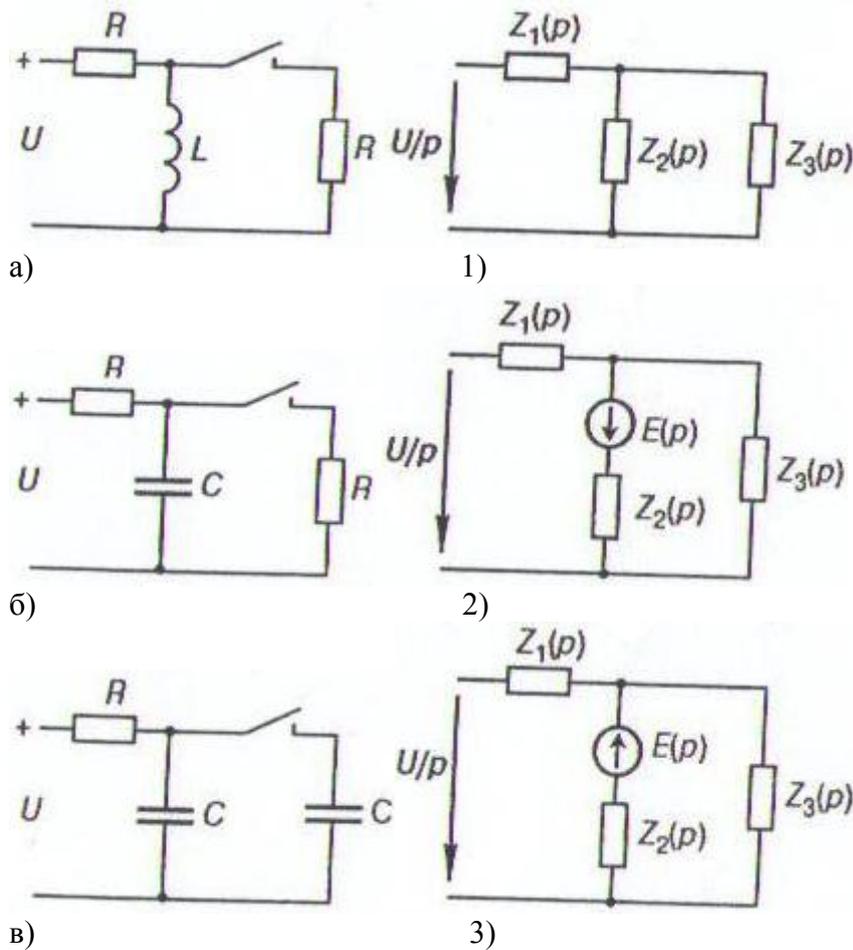
ТЗ №16 Изображение функции  $f(t-t_0)$ , если изображение  $f(t)$  есть  $F(p)$ , имеет вид:

- (НТ 1) а)  $e^{-pt_0} F(p)$ ; б)  $e^{pt_0} F(p)$ ; в)  $F(p-t_0)$ ; г)  $F(p+t_0)$ .

ТЗ №17 Операторная схема замещения цепи, если  $E = \text{const}$ :  
 (НТ 2)



ТЗ №18 Соответствие схем во временной и операторной областях:  
(НТ 3)



ТЗ №19 Операторная передаточная функция цепи (при нулевых начальных условиях) – это:  
(НТ 1) а) реакция цепи на импульсную функцию;

б) отношение реакции цепи к входному воздействию;

в) отношение входного воздействия к реакции цепи;

г) отношение изображения реакции цепи к изображению входного воздействия;

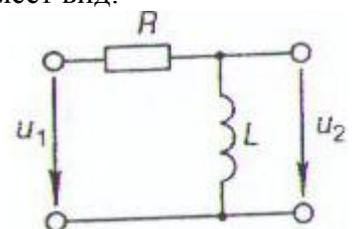
д) реакция цепи на единичный скачок напряжения.

ТЗ №20 Операторная передаточная функция цепи по напряжению имеет вид:

(НТ 1) а)  $pL/R$ ;

б)  $(R + pL)/pL$ ;

в)  $pL/(R + pL)$ ;



$$\Gamma) \sqrt{R^2 + (pL)^2}.$$

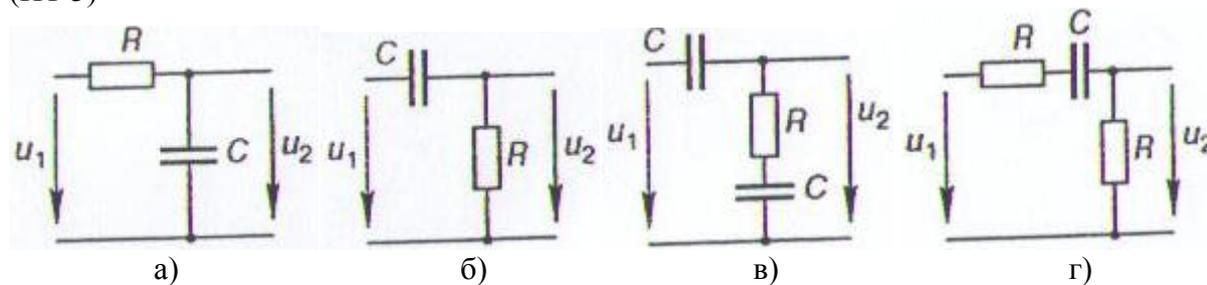
ТЗ №21 Операторная передаточная функция цепи при заданной её переходной характеристике  $g(t) = 0,5e^{-10t}$  имеет вид:

- (НТ 2) а)  $0,5p/(p+100)$ ;  
 б)  $0,5p/(p-100)$ ;  
 в)  $0,5/(p+100)$ ;  
 г)  $0,5/(p-100)$ .

ТЗ №22 Операторная передаточная функция цепи при заданной её переходной характеристике  $g(t) = 1 - e^{-10t}$  имеет вид:

- (НТ 2) а)  $100/(p-100)$ ;  
 б)  $100/(p+100)$ ;  
 в)  $1/[p(p+100)]$ ;  
 г)  $1/[p(p-100)]$ .

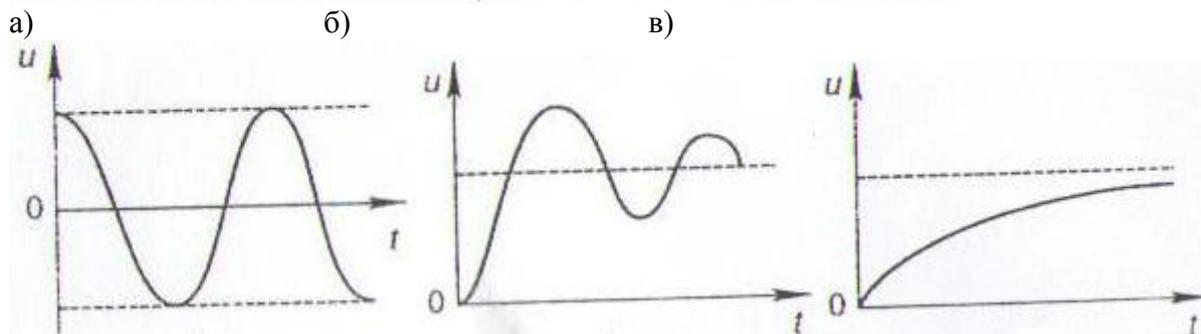
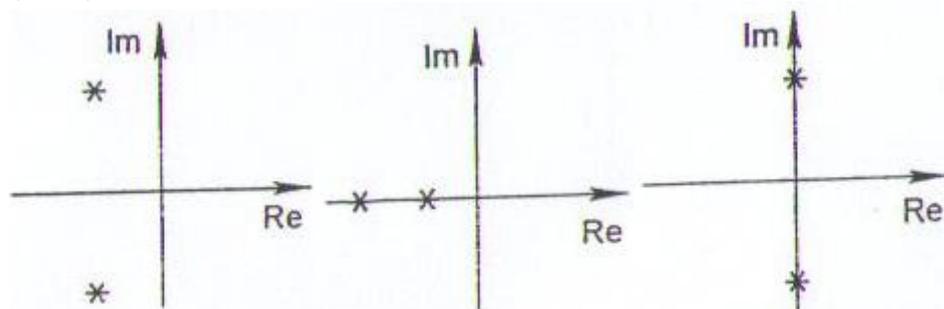
ТЗ №23 Соответствие схемы и операторной передаточной функции по напряжению:  
 (НТ 3)



- а)  $\frac{1}{1+pCR}$ ; б)  $\frac{pCR}{1+p2CR}$ ; в)  $\frac{1+pCR}{2+pCR}$ ; г)  $\frac{pCR}{1+pCR}$ ;

ТЗ №24 Соответствие расположения полюсов передаточной функции цепи на комплексной плоскости и графика переходного напряжения.

(НТ 2)



1)

2)

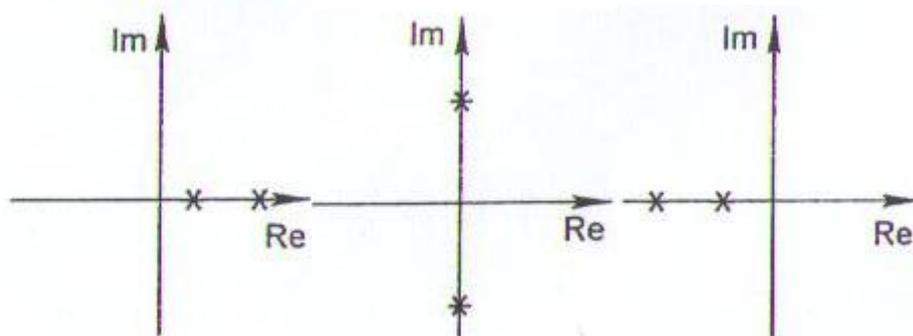
3)

ТЗ №25 Нули операторной передаточной функции являются:

- (НТ 1) а) свободным членом полинома числителя;  
 б) свободным членом полинома знаменателя;  
 в) корнями полинома числителя;  
 г) корнями полинома знаменателя.

ТЗ №26 Расположение полюсов передаточной функции цепи на комплексной плоскости при свободной составляющей переходного напряжения  $u_{\bar{n}\hat{a}} = Ue^{-\alpha t} \cos(\omega_{\bar{n}\hat{d}} t + \varphi)$ .

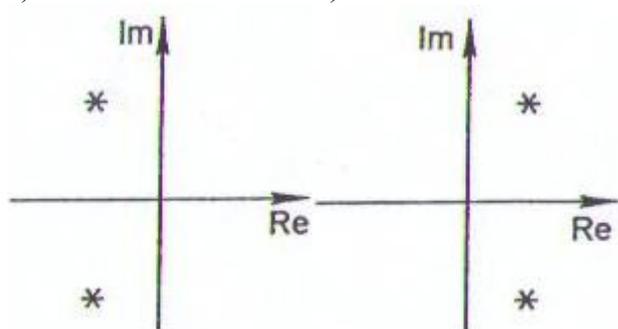
(НТ 2)



а)

б)

в)



г)

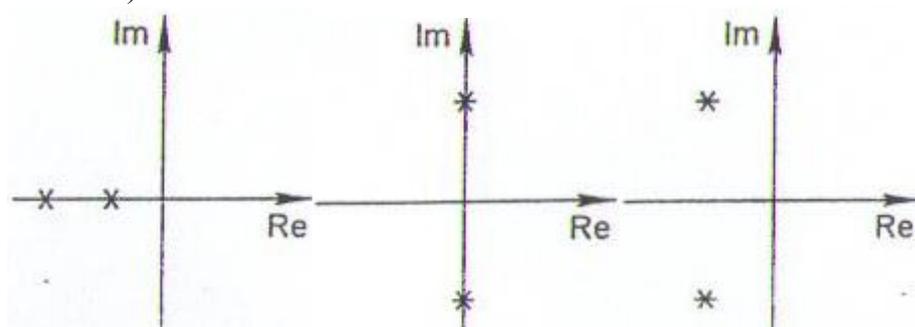
д)

ТЗ №27 Соответствие расположения полюсов передаточной функции цепи на комплексной плоскости и записи свободной составляющей переходного напряжения:

(НТ 3) а)  $u_{\bar{n}\hat{a}} = Ue^{-\alpha t} \cos(\omega_{\bar{n}\hat{d}} t + \varphi)$ ;

б)  $u_{\bar{n}\hat{a}} = U_1 e^{p_1 t} + U_2 e^{p_2 t}$ ;

в)  $u_{\bar{n}\hat{a}} = U \cos(\omega_{\bar{n}\hat{d}} t - \pi/2)$ .



а)

б)

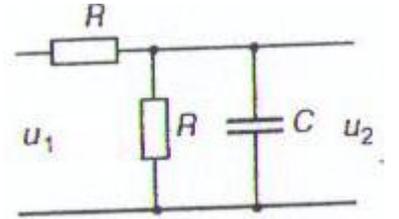
в)

ТЗ №28 Переходная характеристика цепи с  $H(p) = p/(p + \alpha)$  будет иметь вид:

(НТ 1) а)  $1 - e^{-\alpha t}$ ; б)  $1/[\alpha(1 - e^{-\alpha t})]$ ; в)  $\alpha e^{-\alpha t}$ ; г)  $e^{-\alpha t}$ .

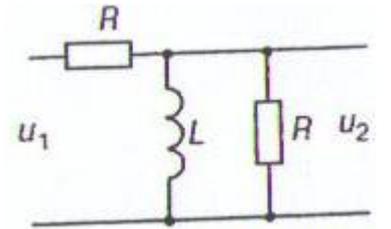
ТЗ №29 Переходная характеристика цепи по напряжению имеет вид:

- (НТ 2) а)  $e^{-t/\tau}$ ;  
 б)  $1 - e^{-t/\tau}$ ;  
 в)  $0,5 + 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 г)  $0,5 - 0,5e^{-t/\tau}$ .



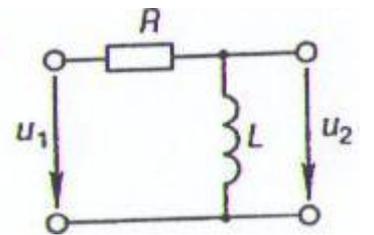
ТЗ №30 Переходная характеристика цепи по напряжению имеет вид:

- (НТ 2) а)  $0,5 + 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 б)  $0,5 - 0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 в)  $0,5e^{-t/\tau}$ ;  
 г)  $1 - e^{-t/\tau}$ .



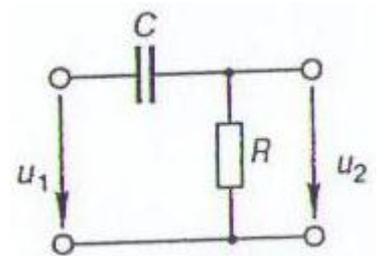
ТЗ №32 Изображение напряжения на выходе  $U_2(p)$  для цепи, если  $u_1(t) = 1(t)$  будет равно:

- (НТ 2) а)  $U_2(p) = \frac{L}{(R+L)p}$ ;  
 б)  $U_2(p) = \frac{L}{R+Lp}$ ;  
 в)  $U_2(p) = \frac{Lp}{R+Lp}$ ;  
 г)  $U_2(p) = \frac{Lp}{Rp+L}$ ;  
 д)  $U_2(p) = \frac{R}{p(Rp+L)}$ .



ТЗ №33 Изображение напряжения на выходе  $U_2(p)$  для цепи, если  $u_1(t) = 1(t)$  будет равно:

- (НТ 2) а)  $U_2(p) = \frac{1}{(RpC+1)p}$ ;  
 б)  $U_2(p) = \frac{RpC}{RpC+1}$ ;  
 в)  $U_2(p) = \frac{1}{RpC+1}$ ;  
 г)  $U_2(p) = \frac{RC}{RpC+1}$ ;  
 д)  $U_2(p) = \frac{1}{p}$ .



Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

**Практическое занятие №14**

**Тестирование по теме «Цепи с распределенными параметрами»**

Цель работы:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Цепи с распределенными параметрами»

Тестовые задания по теме «Цепи с распределенными параметрами»

- ТЗ № 1 Коэффициент ослабления длинной линии без потерь равен:  
(НТ 1) а)  $-1$ ; б)  $-\infty$ ; в)  $\infty$ ; г)  $1$ ; д)  $0$ .
- ТЗ № 2 Коэффициент фазы в рад/км длинной линии без потерь при фазовой  
(НТ 2) скорости  $3 \cdot 10^5$  км/с и частоте гармонического сигнала 150 МГц равен:  
а)  $\pi$ ; б)  $2\pi$ ; в)  $0,2\pi$ ; г)  $0,02\pi$ ; д)  $0,1\pi$ .
- ТЗ № 3 Коэффициент распространения длинной линии с потерями является  
(НТ 1) величиной:  
а) отрицательной; б) мнимой; в) действительной; г) комплексной.
- ТЗ № 4 Вторичными параметрами длинной линии являются коэффициент  
(НТ 1) распространения и \_\_\_\_\_ сопротивление.
- ТЗ № 5 Первичными параметрами длинной линии являются километрические  
(НТ 1) (погонные) индуктивность, емкость, сопротивление и \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 6 Первичными параметрами длинной линии являются километрические  
(НТ 1) (погонные):  
а) падающая волна; б) проводимость; в) импеданс; г) сопротивление; д) емкость; е) отраженная волна; ж) индуктивность.
- ТЗ № 7 Волновое сопротивление длинной линии без потерь с первичными  
(НТ 1) параметрами  $2$  мГн/км и  $8$  нФ/км в Омах равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 8 Коэффициент распространения длинной линии без потерь являются  
(НТ 1) величиной:  
а) рациональной; б) мнимой; в) действительной; г) комплексной; д)

отрицательной.

ТЗ № 9 Коэффициент фазы в рад/км длинной линии, в которой сигнал с частотой  
(НТ 1) 100 кГц распространяется с фазовой скоростью 200000 км/с, равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 10 Неискаженная передача будет в длинной линии с параметрами  $C_0=10$   
(НТ 2) нФ/км;  $L_0=1$  мГн/км;  $G_0=5$  мСм/км при  $R_0=$ \_\_\_\_ Ом/км.  
а) 50; б) 100; в) 500; г) 10; д) 1000; е) 5.

ТЗ № 11 Неискаженная передача будет в длинной линии с параметрами  $C_0=100$   
(НТ 2) нФ/км;  $G_0=2$  мСм/км;  $R_0=200$  Ом/км при  $L_0=$ \_\_\_\_ мГн/км.

ТЗ № 12 Коэффициент отражения в длинной линии в режиме бегущих волн равен  
(НТ 1) \_\_\_\_\_.

ТЗ № 13 Соответствие между режимом в длинной линии и модулем коэффициента  
(НТ 2) отражения:  
а)  $< 1$ ; б) 0; в) 1.

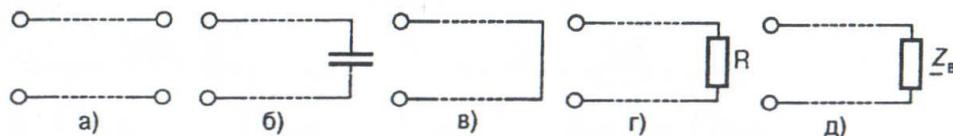
ТЗ № 14 Время запаздывания (ГВЗ) в микросекундах для сигнала в длинной линии  
(НТ 2) без потерь с параметрами  $L_0= 1$  мГн/км;  $C_0=100$  нФ/км при длине линии 2 км равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 15 КолOMETрическая емкость в нФ/км длинной линии без потерь длинной 1 км  
(НТ 2) с параметром  $L_0= 1$  мГн/км при ГВЗ 10 мкс равна \_\_\_\_\_.

ТЗ № 16 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) длинной линии без потерь  
(НТ 2) равна \_\_\_\_\_.

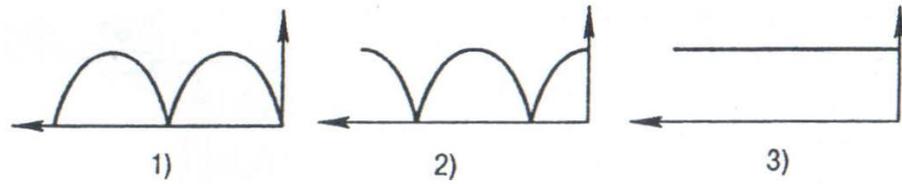
ТЗ № 17 Соответствие между режимом в длинной линии и величиной нагрузки:  
(НТ 2) 1) бегущие волны; 2) стоячие волны; 3) смешанные волны;  
а) 0; б)  $\underline{Z}_B$ ; в)  $\pm jX_H$ ; г)  $\infty$ ; д)  $R$ .

ТЗ № 18 Соответствие между типами нагрузки и режимами работы длинной линии с  
(НТ 2) потерями:  
1) бегущие волны; 2) стоячие волны; 3) смешанные волны;



ТЗ № 19 Коэффициент  $K_{об}$  в линии с волновым сопротивлением 75 Ом,  
(НТ 1) нагруженной на сопротивление 75 Ом, равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 20 Соответствие между распределениями модуля комплексных амплитуд  
(НТ 2) напряжения по длине линии и величиной нагрузки:  
а)  $\underline{Z}_H = \infty$ ; б)  $\underline{Z}_H = \underline{Z}_B$ ; в)  $\underline{Z}_H = 0$ .

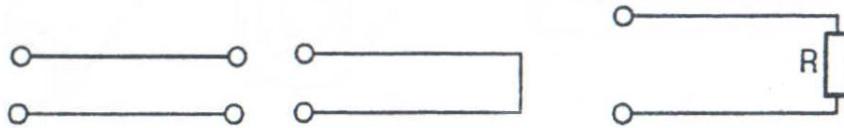


ТЗ № 21 Соответствие между распределениями модулей комплексных амплитуд тока по длине линии (см. ТЗ № 20) и величиной тока:

а)  $Z_H = \infty$ ; б)  $Z_H = Z_B$ ; в)  $Z_H = 0$ .

ТЗ № 22 Соответствие между характером входного сопротивления и длиной  $l$  отрезка длинной линии:

1) резистивный; 2) индуктивный; 3) емкостной.

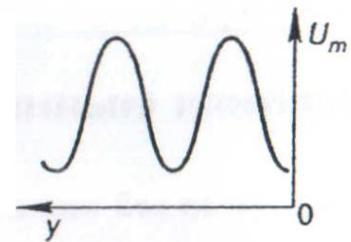


а)  $l < \frac{\lambda}{4}$

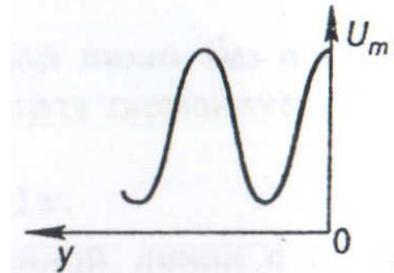
б)  $l < \frac{\lambda}{4}$

в)  $R = \rho_B$ ;  $l < \frac{\lambda}{4}$

ТЗ № 23 Соотношение между нагрузкой и волновым сопротивлением линии для данного распределения амплитуд напряжения  $R_H$  \_\_\_\_\_  $\rho$ .

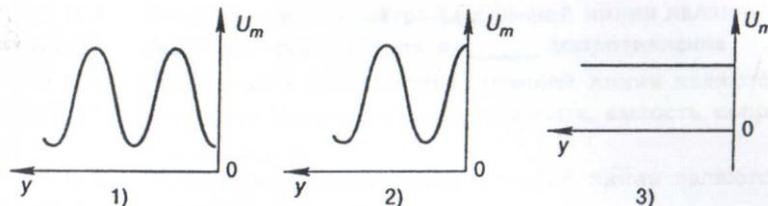


ТЗ № 24 Соотношение между нагрузкой и волновым сопротивлением линии для данного распределения амплитуд напряжения  $R_H$  \_\_\_\_\_  $\rho$ .



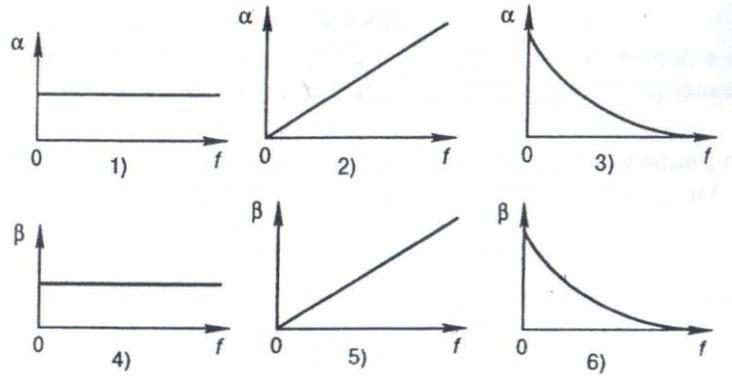
ТЗ № 25 Соотношение между распределениями амплитуд напряжения в линии и нагрузкой:

а)  $R_H > \rho_0$ ; б)  $R_H = \rho_0$ ; в)  $R_H < \rho_0$ .

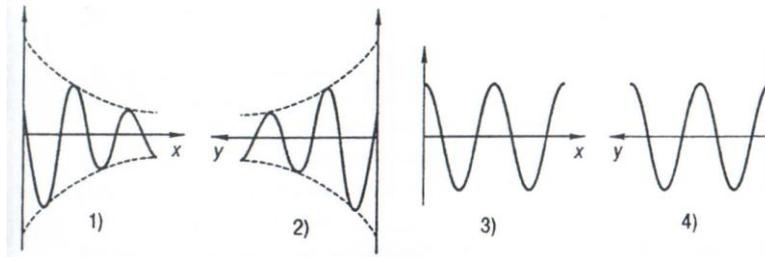


ТЗ № 26 Волновое сопротивление в Омах согласующего четвертьволнового трансформатора, если он необходим между линиями с  $\rho_{01} = 49$  Ом и  $\rho_{02} = 81$  Ом, равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 27 Графики  $\alpha(\omega)$  и  $\beta(\omega)$  для неискаженной передачи волны:  
(НТ 2)



ТЗ № 28 График отраженной волны в линии без потерь имеет вид:  
(НТ 1)



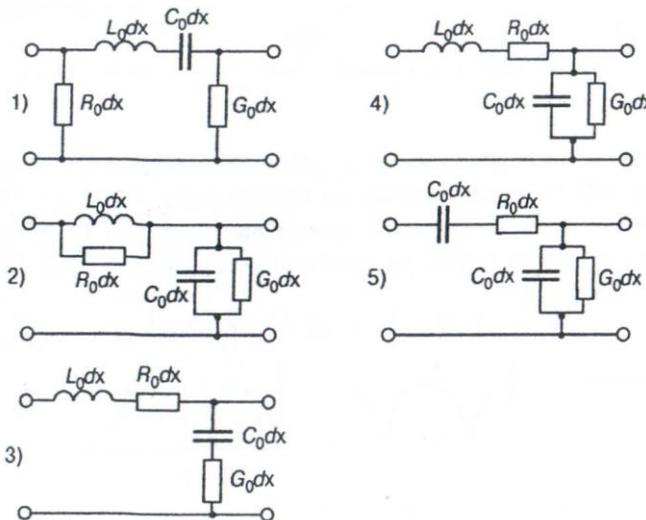
ТЗ № 29 Значение (характер) входного сопротивления четвертьволновой линии без потерь, разомкнутой на конце:  
(НТ 1)

а) индуктивный; б) емкостной; в)  $\infty$ ; г) 0.

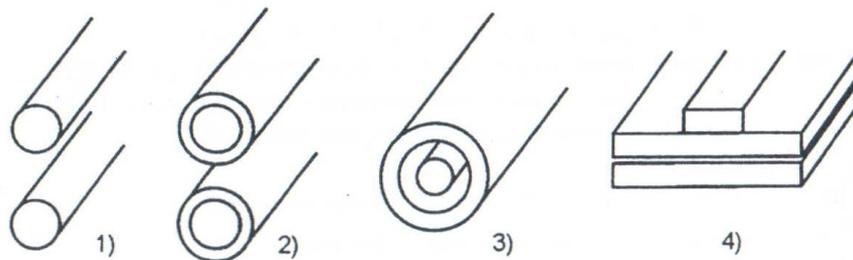
ТЗ № 30 Значение (характер) входного сопротивления линии без потерь длиной  $\lambda/2$ , короткозамкнутой на конце:  
(НТ 1)

а) емкостной; б) индуктивный; в) 0; г)  $\infty$ .

ТЗ № 31 Идеализированная схема замещения линии длиной  $dx$ :  
(НТ 2)



ТЗ № 32 Коаксиальная линия из приведенных — \_\_\_\_\_.  
(НТ 1)



Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №15

#### **Тестирование по теме «Четырехполюсники»**

Цель работы:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Четырехполюсники»

#### Тестовые задания по теме «Четырехполюсники»

ТЗ № 1  
(НТ 1) Пропущенная матрица в выражении  $\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [?] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ :

а)  $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{11} & A_{12} \end{bmatrix}$ ; б)  $\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{11} & Z_{12} \end{bmatrix}$ ; в)  $\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{11} & F_{12} \end{bmatrix}$ ; г)  $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{11} & Y_{12} \end{bmatrix}$ ; д)  $\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{11} & H_{12} \end{bmatrix}$ .

ТЗ № 2  
(НТ 1) Пропущенная матрица в выражении  $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [?] \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$ :

а)  $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{11} & A_{12} \end{bmatrix}$ ; б)  $\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{11} & Z_{12} \end{bmatrix}$ ; в)  $\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{11} & F_{12} \end{bmatrix}$ ; г)  $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{11} & Y_{12} \end{bmatrix}$ ; д)  $\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{11} & H_{12} \end{bmatrix}$ .

ТЗ № 3  
(НТ 1) Пропущенная матрица в выражении  $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [?] \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ :

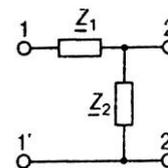
а)  $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{11} & A_{12} \end{bmatrix}$ ; б)  $\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{11} & Z_{12} \end{bmatrix}$ ; в)  $\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{11} & F_{12} \end{bmatrix}$ ; г)  $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{11} & Y_{12} \end{bmatrix}$ ; д)  $\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{11} & H_{12} \end{bmatrix}$ .

ТЗ № 4 Безразмерными параметрами четырехполюсника являются:

(НТ 2) а)  $A_{11}$ ; б)  $A_{12}$ ; в)  $A_{21}$ ; г)  $A_{22}$ ; д)  $H_{22}$ ; е)  $H_{12}$ ; ж)  $H_{21}$ .

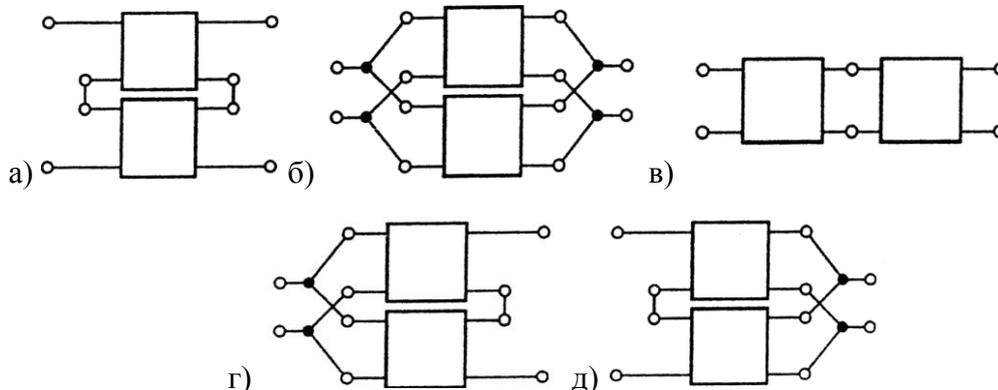
ТЗ № 5 Параметр четырехполюсника  $A_{11}$  для данной схемы равен:

(НТ 3) а)  $Z_2$ ; б)  $1/Z_2$ ; в)  $Z_1$ ; г)  $1+Z_1/Z_2$ ; д) 1.



ТЗ № 6 Схема каскадного соединения двух четырехполюсников \_\_\_\_\_.

(НТ 1)



ТЗ № 7 Схема параллельно-параллельного соединения двух четырехполюсников

(НТ 1) \_\_\_\_\_ (см ТЗ № 6).

ТЗ № 8 Схема последовательно-последовательного соединения двух

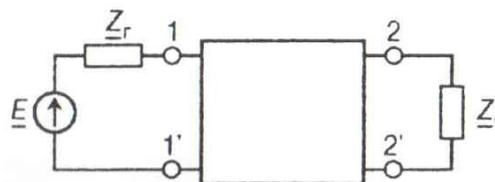
(НТ 1) четырехполюсников \_\_\_\_\_ (см. ТЗ № 6).

ТЗ № 9 Режим согласованного включения будет

(НТ 2) при условиях:

а)  $Z_{\Gamma} = Z_H$ ; б)  $Z_{\Gamma} = Z_{2c}$ ; в)  $Z_{\Gamma} = Z_{1c}$ ;

г)  $Z_H = Z_{1c}$ ; д)  $Z_H = Z_2$ .



ТЗ № 10 Система уравнений передачи четырехполюсников содержит \_\_\_\_\_ уравнения.

(НТ 1)

ТЗ № 11 Количество различных систем параметров четырехполюсника равно \_\_\_\_\_.

(НТ 1)

ТЗ № 12 Системы параметров четырехполюсников:

(НТ 1) а)  $\underline{H}$ ; б)  $\underline{L}$ ; в)  $\underline{Z}$ ; г)  $\underline{X}$ ; д)  $\underline{C}$ ; е)  $\underline{\omega}$ ; ж)  $\underline{R}$ ; з)  $\underline{Y}$ .

ТЗ № 13 Размерность  $\underline{Z}$ -параметров:

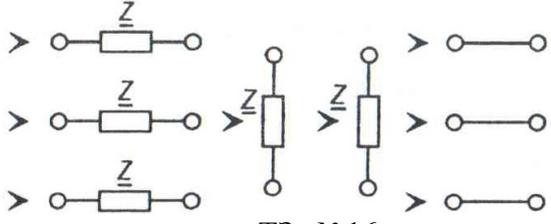
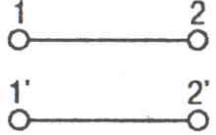
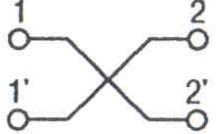
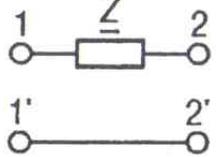
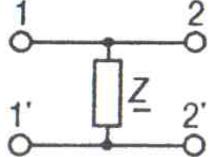
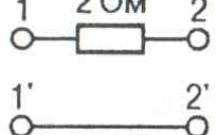
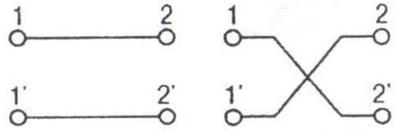
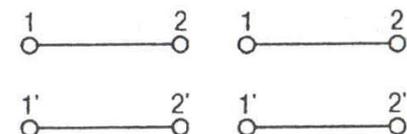
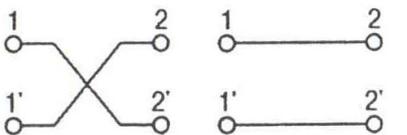
(НТ 1) а) Гн; б) В; в) Вт; г) А; д) Гц; е) Ом.

ТЗ № 14 Размерность  $\underline{Y}$ -параметров:

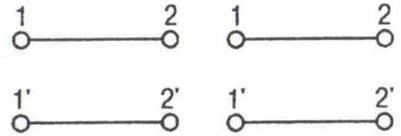
(НТ 1) а) См; б) Гц; в) Вт; г) Гн; д) Ом; е) В.

ТЗ № 15 Четырехполюсник называется \_\_\_\_\_, если он содержит источники

(НТ 1) электрической энергии.

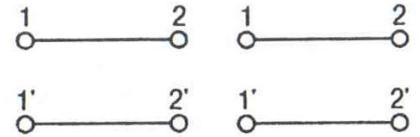
- ТЗ № 16 Схеме Т-образного  
(НТ 2) четырехполюсника из указанных элементов имеет вид \_\_\_\_\_.
- 
- ТЗ № 17 Схема П-образного четырехполюсника из элементов ТЗ №16 имеет вид \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 18 Матрица  $\underline{A}$ -параметров для данного четырехполюсника  
(НТ 3) равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 19 Матрица  $\underline{A}$ -параметров для данного четырехполюсника  
(НТ 3) равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 20 Матрица  $\underline{A}$ -параметров для данного четырехполюсника  
(НТ 3) равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 21 Матрица  $\underline{A}$ -параметров для данного четырехполюсника  
(НТ 3) равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 22 Параметр  $\underline{A}_{11}$  четырехполюсника равна \_\_\_\_\_.
- (НТ 2)
- 
- ТЗ № 23 Матрица  $\underline{A}$ -параметров каскадного  
(НТ 3) соединения двух данных четырехполюсников  
равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 24 Матрица  $\underline{A}$ -параметров параллельно-  
(НТ 2) параллельного соединения двух данных  
четырёхполюсников равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 25 Матрица  $\underline{A}$ -параметров параллельно-  
(НТ 3) параллельного соединения двух данных  
четырёхполюсников равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .
- 
- ТЗ № 26 Матрица  $\underline{A}$ -параметров параллельно-последовательного соединения двух

(НТ 2) данных четырехполюсников равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .

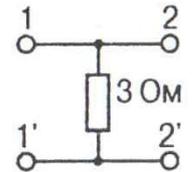


ТЗ № 27 Матрица  $\underline{A}$ -параметров последовательно-последовательного соединения двух данных

(НТ 2) четырехполюсников равна  $\begin{pmatrix} \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet \end{pmatrix}$ .



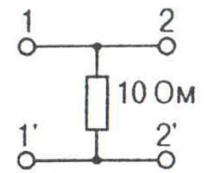
ТЗ № 28 Элемент  $\underline{A}_{11}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника (НТ 1) равен \_\_\_\_\_.



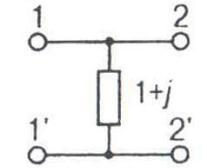
ТЗ № 29 Элемент  $\underline{A}_{12}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника (см. ТЗ № 28) равен (НТ 1) \_\_\_\_\_.

ТЗ № 30 Элемент  $\underline{A}_{21}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника (см. ТЗ № 28) равен (НТ 1) \_\_\_\_\_.

ТЗ № 31 Элемент  $\underline{A}_{21}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника равен (НТ 1) \_\_\_\_\_.

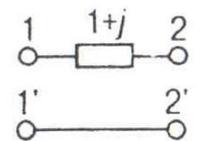


ТЗ № 32 Элемент  $\underline{A}_{21}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника равен: (НТ 1) а)  $(1+j)\sqrt{2}$ ; б)  $1-j$ ; в)  $(1-j)/\sqrt{2}$ ; г)  $(1-j)/2$ ; д)  $(1+j)/2$ .

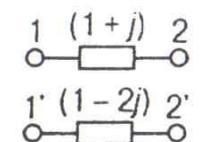


ТЗ № 33 Элемент  $\underline{A}_{12}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника (НТ 1) равен:

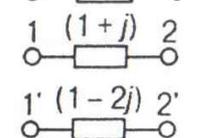
а) 0; б)  $1-j$ ; в)  $1+j$ ; г) 1; д)  $\sqrt{2}$ .



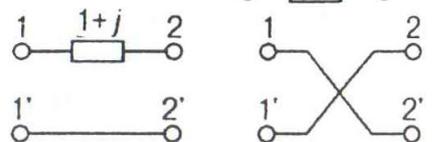
ТЗ № 34 Элемент  $\underline{A}_{12}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника равен: (НТ 1) а)  $2+j$ ; б)  $2-j$ ; в)  $1+j$ ; г) 0; д)  $3j$ ; е) 1; ж)  $1-2j$ .



ТЗ № 35 Элемент  $\underline{A}_{21}$  матрицы  $\underline{A}$ -параметров четырехполюсника равен (НТ 1) \_\_\_\_\_.



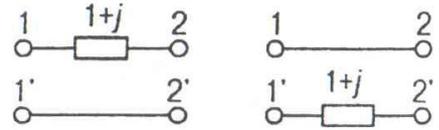
ТЗ № 36 Параметр  $\underline{A}_{21}$  каскадного соединения двух (НТ 2) четырехполюсников равен \_\_\_\_\_.



ТЗ № 37 Параметр  $\underline{A}_{11}$  каскадного соединения двух четырехполюсников (см. ТЗ № 36) (НТ 2) равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 38 Параметр  $A_{12}$  каскадного соединения двух четырехполюсников (см. ТЗ № 36) (НТ 2) равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 39 Параметр  $A_{11}$  параллельно - параллельного (НТ 1) соединения двух четырехполюсников равен \_\_\_\_\_.



ТЗ № 40 Параметр  $A_{21}$  параллельно-параллельного (НТ 1) соединения двух четырехполюсников (см. ТЗ № 39) равен \_\_\_\_\_.

Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №16

#### Тестирование по теме «Цепи с обратной связью»

Цель работы:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Цепи с обратной связью»

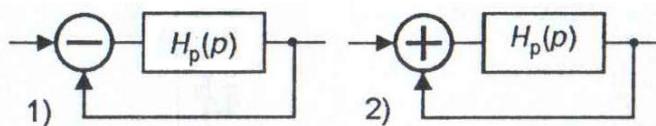
#### Тестовые задания по теме «Цепи с обратной связью»

ТЗ № 1 Последовательность расчета передаточной функции цепи с обратной связью:

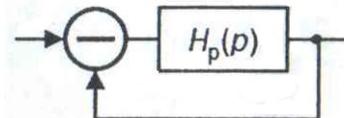
- (НТ 2)
- 1) расчет передаточной функции замкнутой цепи;
  - 2) расчет передаточной функции разомкнутой цепи;
  - 3) расчет передаточной функции петли;
  - 4) расчет передаточной функции цепи обратной связи.

ТЗ № 2 Соответствие передаточной функции и структурной схемы цепи:

- (НТ 2)
- а)  $H_p(p) - 1$ ; б)  $\frac{H_p(p)}{1 - H_p(p)}$ ; в)  $H_p(p) + 1$ ; г)  $\frac{H_p(p)}{1 + H_p(p)}$ .



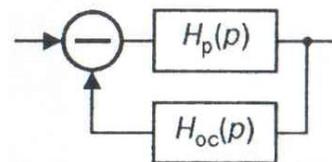
ТЗ № 3 Значение передаточной функции структурной (НТ 1) схемы цепи, если  $H_p(p) = 1$ , равно \_\_\_\_\_.



ТЗ № 4 Значение передаточной функции структурной схемы цепи ТЗ № 3, если (НТ 1)  $H_p(p) = 4$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 5 Значение передаточной функции структурной схемы цепи ТЗ № 3, если (НТ 1)  $H_p(p) = p$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 6 Значение передаточной функции структурной (НТ 1) цепи, если  $H_p(p) = 3$  и  $H_{oc}(p) = 3$ , равно \_\_\_\_\_.



ТЗ № 7 Значение передаточной функции структурной схемы цепи ТЗ № 6, если (НТ 1)  $H_p(p) = 2$  и  $H_{oc}(p) = 2$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 8 Значение передаточной функции структурной схемы цепи ТЗ № 6, если (НТ 1)  $H_p(p) = p$  и  $H_{oc}(p) = 2$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 9 Значение передаточной функции структурной схемы цепи ТЗ № 6, если (НТ 1)  $H_p(p) = 2$  и  $H_{oc}(p) = 2 + p$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 10 Передаточная функция разомкнутой цепи с обратной связью равна \_\_\_\_\_, если (НТ 2) передаточная функция замкнутой цепи  $\frac{p(p+1)}{p^3 + 2p^2 + p + 1}$ .

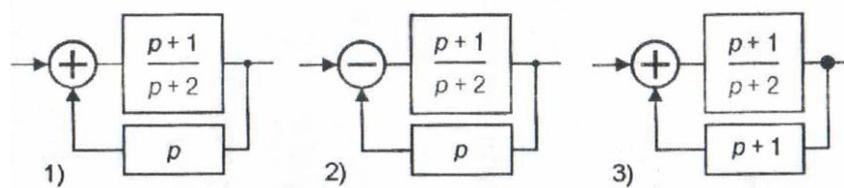
ТЗ № 11 Передаточная функция разомкнутой цепи с обратной связью равна \_\_\_\_\_, если (НТ 1) передаточная функция замкнутой цепи  $\frac{2p+1}{3p^3 + 3p^2 + p + 1}$ .

ТЗ № 12 Передаточная функция цепи обратной связи равна \_\_\_\_\_, если передаточная (НТ 2) функция замкнутой цепи  $\frac{p(p+1)}{p^3 + 2p^2 + p + 1}$ .

ТЗ № 13 Передаточная функция цепи обратной связи равна \_\_\_\_\_, если передаточная (НТ 2) функция замкнутой цепи  $\frac{p(p+1)}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1}$ .

ТЗ № 14 Соответствие между передаточными функциями и структурными схемами:

(НТ 3) а)  $\frac{p+1}{p^2+p+1}$ ; б)  $\frac{p+1}{-p^2+2}$ ; в)  $\frac{p+1}{-p^2-p+1}$ ; г)  $\frac{p+1}{p^2+2p+2}$ .



ТЗ № 15 Передаточная функция  $\frac{p+1}{p^2+2p+2}$  соответствует структурной схеме \_\_\_\_\_  
(НТ 2)

ТЗ № 14.

ТЗ № 16 Передаточная функция  $\frac{p+1}{-p^2+2}$  соответствует структурной схеме \_\_\_\_\_ ТЗ №  
(НТ 2)

14.

ТЗ № 17 Баланс амплитуд в цепи с обратной связью, если  $H_p(\omega) = 0,5$ , будет при  
(НТ 1)  $H_{oc}(\omega)$  равном:

а) 3; б) 0,5; в) 1; г) 2; д) 4.

ТЗ № 18 Баланс амплитуд в цепи с обратной связью, если  $H_{oc}(\omega) = 0,1$ , будет при  
(НТ 1)  $H_p(\omega)$  равном:

а) 10; б) 0,1; в) 1,5; г) 1; д) 2.

ТЗ № 19 Баланс фаз в градусах будет при  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega)$ , равном:

(НТ 1) а) 200; б) 180; в) 90; г) 270; д) 360.

ТЗ № 20 Баланс фаз, если  $\varphi_p(\omega) = \pi/2$ , будет при  $\varphi_{oc}(\omega)$ , равном:

(НТ 1) а)  $\pi$ ; б)  $3,5\pi$ ; в)  $1,5\pi$ ; г)  $2\pi$ ; д)  $3\pi$ .

ТЗ № 21 Баланс фаз, если  $\varphi_{oc}(\omega) = 0,2\pi$ , будет при  $\varphi_p(\omega)$ , равном:

(НТ 1) а)  $1,8\pi$ ; б)  $0,8\pi$ ; в)  $5,8\pi$ ; г)  $3,8\pi$ ; д)  $2\pi$ ; е)  $4\pi$ .

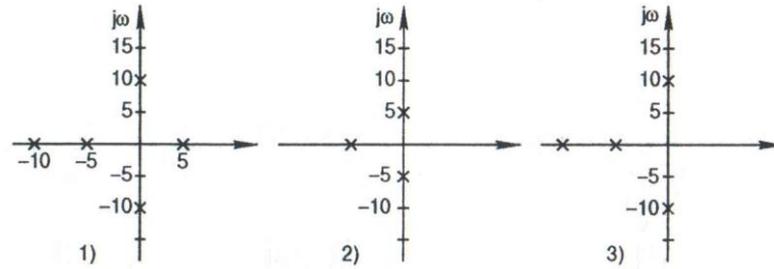
ТЗ № 22 Порядок расчета баланса амплитуд цепи с ОС:

(НТ 1) 1) расчет  $H_{oc}(\omega) H_p(\omega)$ ; 2) расчет  $H_{oc}(\omega)$ ; 3) сравнение с 1; 4) расчет  $H_p(\omega)$ .

ТЗ № 23 Последовательность расчета баланса фаз цепи с ОС:

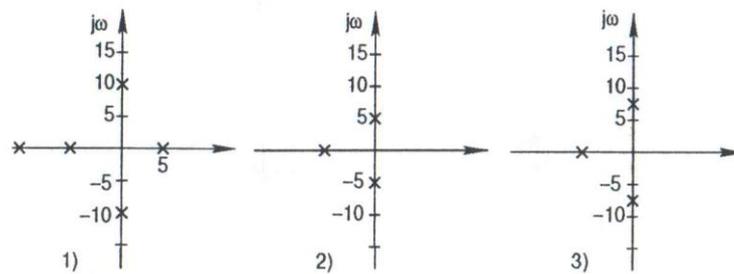
(НТ 1) 1) расчет  $\varphi_p(\omega)$ ; 2) расчет  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega)$ ; 3) расчет  $\varphi_{oc}(\omega)$ ; 4) сравнение с  $2\pi$ .

ТЗ № 24 Функция колебаний на выходе автогенератора  $2 \cos(10t - \varphi_0)$  соответствует (НТ 2) диаграмме полюсов:

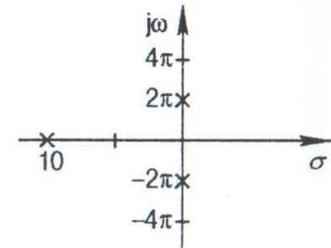


ТЗ № 25 Соответствие функций колебаний на выходе автогенератора диаграмме (НТ 2) полюсов:

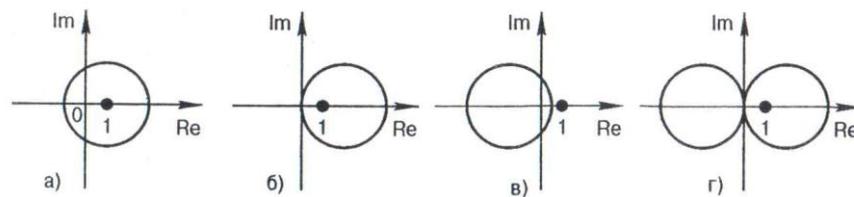
а)  $5 \cos(15t + 10)$ ; б)  $5 \cos(7,5t + 5)$ ; в)  $10 \cos(15t + 10)$ ; г)  $10 \cos(10t + 5)$ .



ТЗ № 26 Частота колебаний в герцах автогенератора с (НТ 2) данной диаграммой полюсов равна \_\_\_\_\_.



ТЗ № 27 Устойчивая цепь с ОС имеет годограф: (НТ 1)



ТЗ № 28 Устойчивая цепь с ОС имеет полином Гурвица:

(НТ 2) а)  $p^2 - 4p + 1$ ; б)  $p^2 - 2p + 1$ ; в)  $p^2 + p$ ; г)  $p^2 + 4p + 1$ ; д)  $p^2 - p$ .

ТЗ № 29 Порядок исследования устойчивости цепи с ОС по критерию Гурвица:

- (НТ 2)
- 1) определение полинома Гурвица;
  - 2) определение передаточной функции;
  - 3) оценка знака определителей Гурвица;
  - 4) запись матрицы Гурвица.

ТЗ № 30 Полиному Гурвица  $p^3 + 4p^2 + 5p + 2$  соответствует определитель (матрица)

(НТ 1)

$$\begin{pmatrix} \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{pmatrix}.$$

ТЗ № 31

(НТ 1)

Определитель Гурвица  $\begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$  равен \_\_\_\_\_.

ТЗ № 32 Соответствие между определителями и полиномами Гурвица:

(НТ 3)

а)  $\begin{vmatrix} 4 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$ ; б)  $\begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ ; в)  $\begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 4 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 4 \end{vmatrix}$ ; г)  $\begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ .

1)  $p^3 + 4p^2 + 5p + 2$ ; 2)  $p^3 + 3p^2 + 2p + 1$ ; 3)  $p^3 + 3p^2 + 3p + 4$ ;

4)  $p^3 + 3p^2 + 2p + 4$ ; 5)  $p^3 + 4p^2 + 3p + 4$ ; 6)  $p^3 + 3p^2 + 5p + 2$ ;

7)  $p^3 + 3p^2 + 3p + 1$ .

ТЗ № 33 Колебание обратной связи вычитается из входного колебания при \_\_\_\_\_

(НТ 1)

обратной связи.

ТЗ № 34 Положительная обратная связь будет при:

(НТ 1)

1)  $H_{oc}(p)H_p(p) \leq 0$ ; 2)  $H_{oc}(p)H_p(p) \geq 0$ ; 3)  $H_{oc}(p)H_p(p) = 0$ ;

4)  $H_{oc}(p)H_p(p) < 0$ ; 5)  $H_{oc}(p)H_p(p) > 0$ .

ТЗ № 35 Свободные колебания затухают по амплитуде, если полюсы передаточной

(НТ 1)

функции лежат в \_\_\_\_\_ половине  $p$ -плоскости:

1) правой; 2) в левой; 3) в нижней; 4) в верхней.

ТЗ № 36 Если годограф  $H_{oc}(j\omega)H_p(j\omega)$  не охватывает точку \_\_\_\_\_, то замкнутая цепь

(НТ 1)

была устойчивой.

1)  $(-1, j1)$ ; 2)  $(0, j0)$ ; 3)  $(-1, j0)$ ; 4)  $(2, j2)$ ; 5)  $(1, j1)$ ; 6)  $(1, j0)$ .

ТЗ № 37 Простейшая RC-цепь вносит сдвиг фаз, не превышающий:

(НТ 1)

1)  $180^\circ$ ; 2)  $60^\circ$ ; 3)  $90^\circ$ ; 4)  $0^\circ$ ; 5)  $120^\circ$ .

ТЗ № 38 RC-генератор с лестничной схемой ОС содержит не менее \_\_\_\_\_ простейших

(НТ 2)

RC-цепей.

ТЗ № 39 Трехточечные схемы автогенераторов бывают \_\_\_\_\_ трехточками:

(НТ 1)

1) трансформаторными; 2) резистивными; 3) емкостными; 4) транзисторными;

5) индуктивными; 6) диодными.

ТЗ № 40 Баланс амплитуд будет при:

- (НТ 1) 1)  $H_{oc}(p)H_p(p) = 1$ ; 2)  $H_{oc}(p)H_p(p) \neq 1$ ; 3)  $H_{oc}(p)H_p(p) = \pi$ ;  
4)  $H_{oc}(p)H_p(p) < 0$ ; 5)  $H_{oc}(p)H_p(p) < 1$ .

ТЗ № 41 Баланс фаз будет при:

- (НТ 1) 1)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) \neq 2\pi n$ ; 2)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) > 2\pi n$ ; 3)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) \geq 2\pi n$ ;  
4)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) = 2\pi n$ ; 5)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) < 2\pi n$ ; 4)  $\varphi_{oc}(\omega) + \varphi_p(\omega) \leq 2\pi n$ ;

Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в шестом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

### Практическое занятие №17

#### Тестирование по теме «Электрические фильтры»

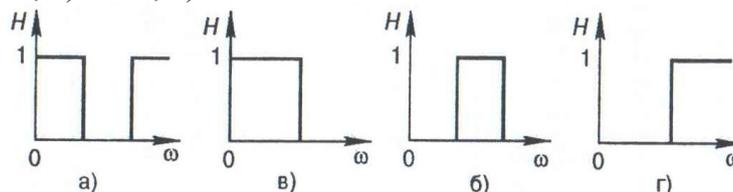
Цель работы:

Оценить уровень полученных студентами знаний по теме «Электрические фильтры»

Тестовые задания по теме «Электрические фильтры»

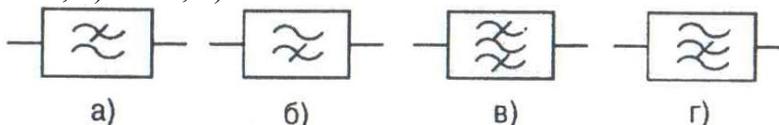
ТЗ № 1 Соответствие между названием фильтра и его АЧХ:

- (НТ 1) 1) ФНЧ; 2) ПФ; 3) ФВЧ; 4) РФ.



ТЗ № 2 Соответствие между названием фильтра и его структурным обозначением:

- (НТ 1) 1) ФНЧ; 2) ПФ; 3) ФВЧ; 4) РФ.



ТЗ № 3 Полоса частот фильтра, в которой ослабление мало, называется полосой \_\_\_\_\_ фильтра.

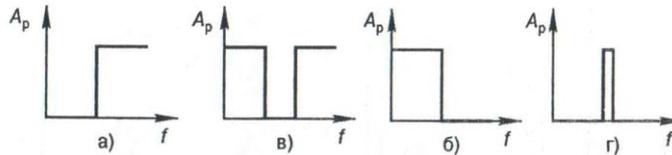
ТЗ № 4 Тип второго элемента схемы LC-ФНЧ будет \_\_\_\_\_, если

(НТ 1) 
$$Z_{ex}(p) = \frac{1}{10p + \frac{1}{10p + \frac{1}{\dots}}}$$

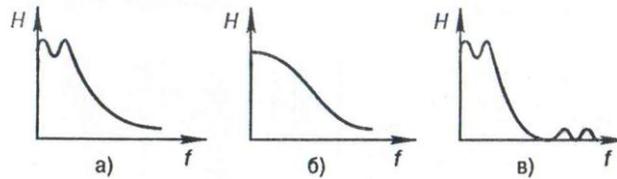
- 1) емкость; 2) резистор; 3) индуктивность.

ТЗ № 5 Соответствие между названием фильтра и его рабочим ослаблением:

- (НТ 2) 1) ПФ; 2) ФНЧ; 3) РФ; 4) ФВЧ.



ТЗ № 6 Соответствие между типом ФНЧ и его АЧХ:  
(НТ 2) 1) Баттерворта; 2) Чебышева; 3) Золоторева.



ТЗ № 7 Первый элемент схемы LC-ФНЧ, если его  $Z_{ex}(p) = 10p + \frac{1}{10p + \frac{1}{\dots}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 8 Номинальное значение первого элемента схемы LC-ФНЧ, если  $Z_{ex}(p) = \frac{10^3}{1,2p + \frac{1}{2,4p + \frac{1}{\dots}}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 9 Значение второго элемента схемы LC-ФНЧ с миллигенри, если полоса пропускания фильтра  $\omega_{П} = 10^5$  рад/с, а входное сопротивление  $Z_{ex}(p) = \frac{10^3}{1,2p + \frac{1}{2,4p + \frac{1}{\dots}}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 10 Число реактивных элементов схемы LC-ФНЧ, если  $Z_{ex}(p) = \frac{10^3}{1,2p + \frac{1}{2,4p + 1}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 11 Число реактивных элементов схемы LC-ФНЧ, если  $Z_{ex}(p) = \frac{10^3}{1,2p + \frac{1}{2,4p + \frac{1}{1,2p + 1}}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 12 Значение третьего элемента схемы LC-ФНЧ в нанофарадах, если полоса пропускания фильтра  $\omega_{П} = 10^5$  рад/с, а входное сопротивление  $Z_{ex}(p) = \frac{10^3}{1,3p + \frac{1}{2,4p + \frac{1}{1,3p + 1}}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 13 Сопротивление нагрузки схемы LC-ФНЧ в килоомах, если  $Z_{ex}(p) = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3} p + \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-3} p + 10^{-3}}}$ , равно \_\_\_\_\_.

ТЗ № 14 Порядок синтеза пассивного LC-ФНЧ:  
(НТ 3) 1) определение передаточной функции;  
2) построение схемы ФНЧ;  
3) определение входного сопротивления;

- 4) разложение входного сопротивления в цепную дробь;  
 5) определение полюсов передаточной функции;  
 6) вычисление числа реактивных элементов фильтра.
- ТЗ № 15 Полоса задержания ФНЧ в килогерцах, если ее нормативное значение равно (НТ 1) 1,2 при полосе пропускания  $f_n = 10$  кГц, равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 16 Рабочее ослабление ФНЧ Баттерворта на нулевой частоте в децибелах равно: (НТ 1) 1) 2; 2) 1; 3) 0,5; 4) 0; 5) -1; 6) 3.
- ТЗ № 17 Коэффициент неравномерности ослабления  $\varepsilon$  ФНЧ Баттерворта, если (НТ 1) максимальное допустимое ослабление фильтра  $A_{p \max} = 10$  дБ, равен \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 18 Максимальное допустимое ослабление ФНЧ Баттерворта в децибелах, если (НТ 2) коэффициент неравномерности ослабления  $\varepsilon = 3$ , равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 19 Значение рабочей комплексной передаточной функции фильтра, если его (НТ 1) рабочее ослабление  $A_p = 10$  дБ, равно:  
 1)  $1/\sqrt{10}$ ; 2) 0,1; 3)  $\sqrt{10}$ ; 4) 1; 5) 10.
- ТЗ № 20 Рабочее ослабление фильтра в децибелах, если его рабочая комплексная (НТ 1) функция равна  $1/\sqrt{2}$ , равно:  
 1) 2; 2) 3; 3)  $\sqrt{2}$ ; 4)  $1/\sqrt{2}$ ; 5) 1.
- ТЗ № 21 Значение АЧХ ФНЧ Баттерворта второго порядка на номинальной частоте (НТ 2)  $\Omega = \sqrt{2}$ , если коэффициент неравномерности  $\varepsilon = \sqrt{2}$ , равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 22 Значение АЧХ ФНЧ Баттерворта первого порядка на нормированной частоте (НТ 1)  $\Omega = \sqrt{3}$  если коэффициент неравномерности  $\varepsilon = \sqrt{5}$ , равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 23 Ослабление ФНЧ Баттерворта первого порядка на нормированной частоте (НТ 1)  $\Omega = \sqrt{3}$  в децибелах, если коэффициент неравномерности ослабления  $\varepsilon = \sqrt{3}$ , равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 24 Ослабление ФНЧ Баттерворта третьего порядка на частоте среза полосы (НТ 1) пропускания в децибелах, если коэффициент неравномерности ослабления  $\varepsilon = 1$ , равно \_\_\_\_\_.
- ТЗ № 25 Порядок расчета величины ослабления ФНЧ Баттерворта на заданной частоте (НТ 3)  $\omega$ :  
 1) вычисляем произведение коэффициента неравномерности на степень номинальной частоты ( $\varepsilon \Omega^n$ );  
 2) возводим номинальную частоту в степень, равную порядку ФНЧ ( $\Omega^n$ );  
 3) нормируем заданную частоту ( $\omega/\omega_n$ );  
 4) возводим в квадрат произведение ( $\varepsilon^2 \Omega^{2n}$ );  
 5) вычисляем ослабление в децибелах ( $10 \lg[1 + \varepsilon^2 \Omega^{2n}]$ ).
- ТЗ № 26 Ослабление в полосе пропускания ФНЧ Чебышева шестого порядка (НТ 1) последовательно измеряется от 0 до  $A_{p \max}$  \_\_\_\_\_ раз.
- ТЗ № 27 Полюсы передаточной функции ФНЧ Баттерворта располагаются в  $p$ - (НТ 1) плоскости:  
 1) на треугольнике; 2) на эллипсе; 3) на квадрате; 4) на окружности.
- ТЗ № 28 Полюсы передаточной функции ФНЧ Чебышева располагаются в  $p$ -плоскости: (НТ 1) 1) на треугольнике; 2) на эллипсе; 3) на квадрате; 4) на окружности.
- ТЗ № 29 Порядок определения передаточной функции ФНЧ: (НТ 3) 1) вычисление полюсов в левой полуплоскости  $p$ -плоскости;  
 2) формирование передаточной функции по теореме Виета;  
 3) определение порядка ФНЧ;  
 4) вычисление коэффициента неравномерности ослабления и нормирование частот;  
 5) определение выражения квадрата модуля передаточной функции.
- ТЗ № 30 Максимальному ослаблению в полосе пропускания ФНЧ Баттерворта (НТ 1) соответствует номинальная частота, равная:

1)  $\sqrt{2}$ ; 2) 1; 3) 10; 4) 2; 5) 3.

ТЗ № 31 Ослабление ФНЧ Золоторева в полосе задерживания может достичь:

(НТ 1) 1)  $A_{p \max}$ ; 2) 0; 3)  $A_{p \min}$ ; 4)  $\infty$ .

ТЗ № 32 Ослабление ФНЧ Чебышева в полосе пропускания может достичь:

(НТ 1) 1)  $A_{p \max}$ ; 2) 0; 3)  $A_{p \min}$ ; 4)  $\infty$ .

ТЗ № 33 Модуль передаточной функции ФНЧ Золоторева в полосе задерживания равен:

1)  $A_{p \max}$ ; 2)  $\infty$ ; 3)  $A_{p \min}$ ; 4) 0; 5) 1.

ТЗ № 34 Ослабление ФВЧ на основе прототипа ФНЧ Чебышева в полосе задерживания равен:

1) 0; 2) 1; 3)  $A_{p \max}$ ; 4)  $A_{p \min}$ ; 5) -1.

ТЗ № 35 Порядок синтеза ФВЧ:

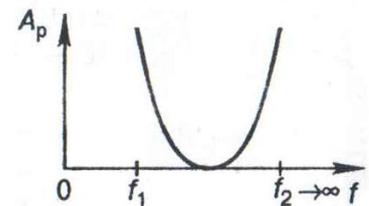
- (НТ 3) 1) определить передаточную функцию ФНЧ;  
 2) преобразуя шкалу частот, перейти от передаточной функции ФНЧ к передаточной функции ФВЧ;  
 3) определить требования к ФНЧ-прототипу;  
 4) определить схему ФВЧ;  
 5) определить схемную реализацию лестничного ФНЧ.

ТЗ № 36 Ослабление ПФ на основе прототипа ФНЧ Чебышева в полосе пропускания может достичь:

1) 0; 2) 1; 3)  $A_{p \max}$ ; 4)  $A_{p \min}$ ; 5) -1.

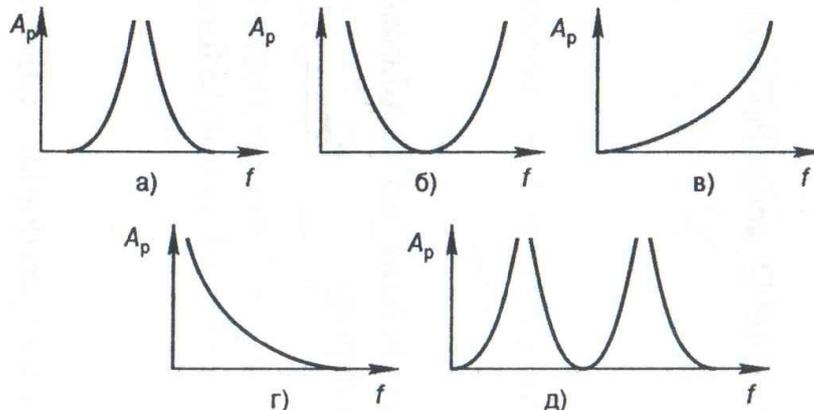
ТЗ № 37 Полосу пропускания полосового фильтра будет:

- (НТ 1) 1)  $[0, f_1]$ ; 2)  $[0, f_2]$ ; 3)  $[f_1, \infty]$ ; 4)  $[f_2, \infty]$ ;  
 5)  $[f_1, f_2]$ .



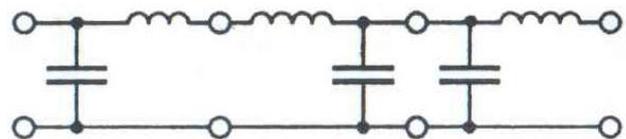
ТЗ № 38 Частотная зависимость  $A_p$  фильтра верхних частот будет:

(НТ 1)



ТЗ № 39 Порядок  $n$  фильтра равен

(НТ 1) \_\_\_\_\_.



ТЗ № 40 Основное достоинство фильтров Баттерворта:

- (НТ 2) 1) малое ослабление в ПП;  
 2) быстрое нарастание рабочего ослабления в ПЗ;  
 3) малый разброс значений параметров элементов;  
 4) равномерность АЧХ в ПП;  
 5) малое количество элементов.

ТЗ № 41 Выражение операторной передаточной функции  $H(p)$ , если фильтр представлен каскадным соединением трех звеньев, имеет вид:

$$1) H(p) = H_1(p) + H_2(p) + H_3(p); 2) H(p) = \frac{U_1(p)}{U_0(p)}; 3) H(p) = \frac{U_3(p)}{U_0(p)};$$

$$4) H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}; 5) H(p) = \frac{U_3(p)}{U_2(p)}; 6) H(p) = H_1(p)H_2(p)H_3(p);$$

$$7) H(p) = \frac{U_1(p)U_2(p)U_3(p)}{U_0(p)U_1(p)U_2(p)}.$$

Форма отчетности: Заполненный бланк тестового задания.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в седьмом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Н. Соболев. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 502 с.

Дополнительная литература

Теоретические основы электротехники. 30 лекций по теории электрических цепей : учебное пособие для вузов / А. Б. Новгородцев. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Питер, 2006. - 576 с.

## 9.2. Методические указания по выполнению курсовой работы, контрольной работы

**Контрольная работа** «Расчет сложной электрической цепи постоянного тока» посвящена определению токов в ветвях заданной электрической схемы различными методами. Один из вариантов такой схемы представлен на рис. 9.1.

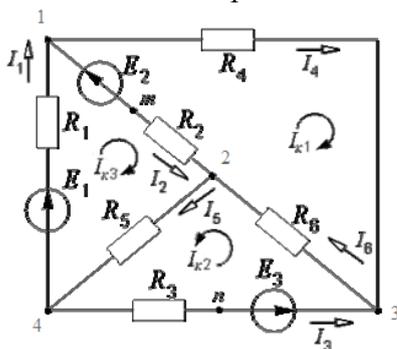


Рис. 9.1.

Задание включает в себя следующие разделы:

1. Составление системы уравнений по первому и второму законам Кирхгофа.
2. Определение токов во всех ветвях методом узловых потенциалов и проверка правильности расчетов по первому закону Кирхгофа.
3. Расчет мощности на всех участках цепи и составление баланса мощностей.
4. Определение токов во всех ветвях методом контурных токов.
5. Сравнение результатов, полученных двумя методами.
6. Определение методом эквивалентного генератора тока в ветви № 1 (при этом для нахождения напряжения холостого хода необходимо использовать метод наложения, а внутреннее сопротивление эквивалентного генератора определяется как входное сопротивление двухполюсника)
7. Построение потенциальной диаграммы для контура, содержащего две ЭДС.

Расчет производится каждым студентом индивидуально, по вариантам.

При выполнении контрольной работы используются теоретические сведения, представленные в первом разделе данной дисциплины.

**Курсовая работа** «Расчет частотных и переходных характеристик линейных цепей» посвящена расчету комплексных передаточных функций, частотных характеристик и переходных характеристик. Один из вариантов заданных схем представлен на рис. 9.2.

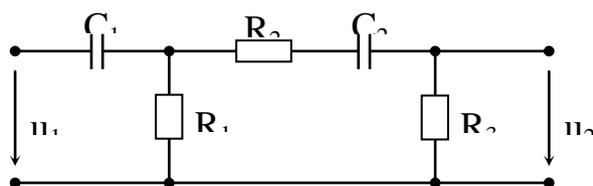


Рис. 9.2.

Каждое индивидуальное задание включает в себя выполнение студентом следующих разделов:

1. Расчет комплексного входного сопротивления  $Z_{ВХ}(j\omega)$  и его амплитудно-частотной характеристики  $Z_{ВХ}(\omega)$  и фазово-частотной характеристики  $\varphi_z(\omega)$ .

2. Расчет передаточной функции по напряжению  $H_U(j\omega)$  и его амплитудно-частотной характеристики  $H_U(\omega)$  и фазово-частотной характеристики  $\varphi(\omega)$ .

3. Построение графиков  $Z_{ВХ}(\omega)$ ,  $\varphi_z(\omega)$ ,  $H_U(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  при заданных параметрах элементов схемы.

4. Расчет и построение годографов  $Z_{ВХ}(j\omega)$ ,  $H_U(j\omega)$ .

5. Расчет и построение графика переходной характеристики классическим методом.

Расчеты выполняются двумя способами: вручную в программе схемотехнического моделирования Multisim.

При выполнении курсовой работы используются теоретические сведения, представленные во втором и третьем разделах данной дисциплины.

## 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. ОС Windows 7 Professional;
2. Microsoft Imagine Premium;
3. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
4. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;

## 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР или ПЗ</i>
1	2	3	4
ЛР	Дисплейный класс	Учебная мебель. Интерактивная доска	1-11
ПЗ	Дисплейный класс	Учебная мебель. Интерактивная доска	1-17
КР	ЧЗЗ	Учебная мебель. Оборудование 15- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF); принтер HP LaserJet P3005	-

кр	ЧЗЗ	Учебная мебель. Оборудование 15- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF); принтер HP LaserJet P3005	-
СР	ЧЗЗ	Учебная мебель. Оборудование 15- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF); принтер HP LaserJet P3005	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС	
ОПК-4	способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ	1. Основные законы и общие методы анализа цепей	1.1. Элементы цепей.	Вопросы к зачету 1-18	
			1.2. Закон Ома.		
			1.3. Законы Кирхгофа.		
			1.4. Резистивные цепи.		
			1.5. Баланс мощностей.		
			1.6. Двухполюсники.		
			1.7. Метод эквивалентного генератора.		
			1.8. Метод наложения.		
			1.9. Метод узловых потенциалов.		
			1.10. Метод контурных токов.		
ПК-7	готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта	2. Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей	2.1. Гармоническое колебание.	Экзаменационные вопросы 1-23	
			2.2. Комплексные величины.		
			2.3. Символическая схема.		
			2.4. Символический метод расчета цепей.		
			2.5. Баланс мощностей.		
			2.6. Комплексная передаточная функция.		
			2.7. Частотные характеристики цепей.		
			2.8. Колебательные контуры и их параметры.		
ПК-16	готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования	3. Режим негармонических воздействий	3.1. Классический метод анализа.	Экзаменационные вопросы 1-23	
			3.2. Временной метод анализа.		
			3.3. Операторный метод анализа.		
		4. Цепи с распределенными параметрами	4.1. Длинные линии.		Экзаменационные вопросы 1-23
			4.2. Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.		
			4.3. Падающая и отраженная волны в линии.		
			4.4. Уравнение передачи длинной линии.		
			4.5. Линия без потерь.		
			4.6. Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.		
		5. Четырехполюсники	5.1. Уравнения передачи четырехполюсников.		Экзаменационные вопросы 1-23
5.2. Параметры					

			четырёхполюсников.	
			5.3.Схемы замещения четырёхполюсников.	
			5.4.Характеристические параметры четырёхполюсника.	
			5.5.Рабочие параметры четырёхполюсников.	
			5.6.Регулярные однонаправленные соединения четырёхполюсников.	
		6.Цепи с обратной связью и автоколебатель ные цепи	6.1.Цепи с обратной связью.	
			6.2.Устойчивость линейных цепей с обратной связью.	
			6.3.Автоколебательные цепи.	
			6.4.Различные схемы автогенераторов.	
		7.Электрическ ие фильтры	7.1.Основные понятия и определения	
			7.2.Нормированные частоты и сопротивления.	
			7.3.Преобразование шкалы частот.	
			7.4.Основы синтеза ФНЧ- прототипа.	

## 2. Вопросы к зачету, экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОПК- 4	способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных	1.Элементы цепей.	1.Основные законы и общие методы анализа цепей
			2.Закон Ома.	
			3.Законы Кирхгофа.	
			4.Резистивные цепи.	
			5.Баланс мощностей.	
			6.Двухполюсники.	
			7.Метод эквивалентного генератора.	
			8.Метод наложения.	
			9.Метод узловых потенциалов.	
			10.Метод контурных токов.	
			11.Гармоническое колебание.	2.Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей
			12.Комплексные величины.	
			13.Символическая схема.	
			14.Символический метод расчета цепей.	
			15.Баланс мощностей.	
			16.Комплексная передаточная	

		программ	функция.	
			17.Частотные характеристики цепей.	
			18.Колебательные контуры и их параметры.	
2	ПК-7	готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта	1.Элементы цепей.	1.Основные законы и общие методы анализа цепей
			2.Закон Ома.	
			3.Законы Кирхгофа.	
			4.Резистивные цепи.	
			5.Баланс мощностей.	
			6.Двухполосники.	
			7.Метод эквивалентного генератора.	
			8.Метод наложения.	
			9.Метод узловых потенциалов.	
			10.Метод контурных токов.	
			11.Гармоническое колебание.	2.Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей
			12.Комплексные величины.	
			13.Символическая схема.	
			14.Символический метод расчета цепей.	
			15.Баланс мощностей.	
			16.Комплексная передаточная функция.	
			17.Частотные характеристики цепей.	
			18.Колебательные контуры и их параметры.	
3	ПК-16	готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования	1.Элементы цепей.	1.Основные законы и общие методы анализа цепей
			2.Закон Ома.	
			3.Законы Кирхгофа.	
			4.Резистивные цепи.	
			5.Баланс мощностей.	
			6.Двухполосники.	
			7.Метод эквивалентного генератора.	
			8.Метод наложения.	
			9.Метод узловых потенциалов.	
			10.Метод контурных токов.	
			11.Гармоническое колебание.	2.Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей
			12.Комплексные величины.	
			13.Символическая схема.	
			14.Символический метод расчета цепей.	
			15.Баланс мощностей.	
			16.Комплексная передаточная функция.	
			17.Частотные характеристики цепей.	
			18.Колебательные контуры и их параметры.	

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела	
	Код	Определение			
1	2	3	4	5	
1	ОПК-4	способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ	1.Классический метод анализа.	3.Режим негармонических воздействий	
			2.Временной метод анализа.		
			3.Операторный метод анализа.		
			4.Длинные линии.	4.Цепи с распределенными параметрами	
			5.Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.		
			6.Падающая и отраженная волны в линии.		
			7.Уравнение передачи длинной линии.		
			8.Линия без потерь.		
			9.Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.		
			10.Уравнения передачи четырехполюсников.		5. Четырехполюсники
			11.Параметры четырехполюсников.		
			12.Схемы замещения четырехполюсников.		
			13.Характеристические параметры четырехполюсника.		
			14.Рабочие параметры четырехполюсников.		
			15.Регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников.		
			16.Цепи с обратной связью.	6. Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи	
			17.Устойчивость линейных цепей с обратной связью.		
			18.Автоколебательные цепи.		
			19.Различные схемы автогенераторов.	7.Электрические фильтры	
			20.Основные понятия и определения		
			21.Нормированные частоты и сопротивления.		
			22.Преобразование шкалы частот.		
			23.Основы синтеза ФНЧ-прототипа.		
2	ПК-7	готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта	1.Классический метод анализа.	3.Режим негармонических воздействий	
			2.Временной метод анализа.		
			3.Операторный метод анализа.		
			4.Длинные линии.	4.Цепи с распределенными параметрами	
			5.Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.		
			6.Падающая и отраженная волны в линии.		
			7.Уравнение передачи длинной линии.		
			8.Линия без потерь.		

3	ПК-16	готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования	9. Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.	5. Четырехполюсники			
			10. Уравнения передачи четырехполюсников.				
			11. Параметры четырехполюсников.				
			12. Схемы замещения четырехполюсников.				
			13. Характеристические параметры четырехполюсника.				
			14. Рабочие параметры четырехполюсников.				
			15. Регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников.				
			16. Цепи с обратной связью.	6. Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи			
			17. Устойчивость линейных цепей с обратной связью.				
			18. Автоколебательные цепи.				
			19. Различные схемы автогенераторов.	7. Электрические фильтры			
			20. Основные понятия и определения				
			21. Нормированные частоты и сопротивления.				
			22. Преобразование шкалы частот.				
			23. Основы синтеза ФНЧ-прототипа.				
					готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования	1. Классический метод анализа.	3. Режим негармонических воздействий
						2. Временной метод анализа.	
						3. Операторный метод анализа.	
						4. Длинные линии.	4. Цепи с распределенными параметрами
						5. Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.	
						6. Падающая и отраженная волны в линии.	
						7. Уравнение передачи длинной линии.	
						8. Линия без потерь.	
9. Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.	5. Четырехполюсники						
10. Уравнения передачи четырехполюсников.							
11. Параметры четырехполюсников.							
12. Схемы замещения четырехполюсников.							
13. Характеристические параметры четырехполюсника.							
14. Рабочие параметры четырехполюсников.							
15. Регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников.							
16. Цепи с обратной связью.		6. Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи					
17. Устойчивость линейных цепей с обратной связью.							
18. Автоколебательные цепи.							

			19.Различные схемы автогенераторов.	
			20.Основные понятия и определения	7.Электрические фильтры
			21.Нормированные частоты и сопротивления.	
			22.Преобразование шкалы частот.	
			23.Основы синтеза ФНЧ-прототипа.	

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b> (ОПК-4): -навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях. (ПК-7): - основы теории, методы и средства теоретического и экспериментального исследования линейных и нелинейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях; основы теории четырехполюсников и цепей с распределенными параметрами, устойчивости электрических цепей с обратной связью, электрических аналоговых, дискретных и</p>	<b>отлично</b>	Студент должен во время ответа показать знания основ теории линейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях; основ теории четырехполюсников и цепей с распределенными параметрами, устойчивости электрических цепей с обратной связью, электрических фильтров. Студент должен иметь навыки владения экспериментального исследования электрических цепей в рамках физического и математического моделирования. Студент во время ответа должен продемонстрировать умения рассчитывать и измерять параметры и характеристики электрических цепей.
	<b>хорошо</b>	Ответ содержит неточности. Дополнительные вопросы требуются, но студент с ними справляется отлично.

<p>цифровых фильтров. (ПК-16): - навыки сбора научно-технической информации в отечественных и зарубежных источниках. <b>Уметь</b> (ОПК-4): -осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов в области теории электрических цепей.</p> <p>(ПК-7): - рассчитывать и измерять параметры и характеристики линейных и нелинейных электрических цепей, рассчитывать и анализировать параметры электрических цепей и фильтров на персональных компьютерах.</p> <p>(ПК-16): -изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области исследования электрических цепей. <b>Владеть</b> (ОПК-4): -навыками использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ по исследованию электрических цепей.</p> <p>(ПК-7): - навыками экспериментального исследования электрических цепей в</p>	<p><b>удовлетворительно</b></p>	<p>Ответил только на один вопрос, либо слабо ответил на оба вопроса. На дополнительные вопросы отвечает неуверенно.</p>
	<p><b>неудовлетворительно</b></p>	<p>На оба вопроса студент отвечает неубедительно. На дополнительные вопросы преподавателя также не может ответить.</p>
	<p><b>зачтено</b></p>	<p>Студент должен во время ответа показать знания основ теории линейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях. Студент должен иметь навыки владения экспериментального исследования электрических цепей. Студент во время ответа должен продемонстрировать умения рассчитывать и измерять параметры электрических цепей</p>
	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>На вопросы студент отвечает неубедительно. На дополнительные вопросы преподавателя также не может ответить.</p>

рамках физического и математического моделирования. (ПК-16): - навыками обработки собранной научно-технической информации в области исследования электрических цепей.		
---	--	--

#### **4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности**

Дисциплина теория электрических цепей направлена на изучение теории различных электрических цепей и ее прикладного применения для решения проблем передачи, обработки и распределения электрических сигналов управления и связи. Дисциплина должна обеспечивать формирование фундамента подготовки будущих специалистов в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Изучение дисциплины теория электрических цепей предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- практические занятия,
- контрольную работу,
- курсовую работу,
- самостоятельную работу студента,
- зачет,
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Основные законы и общие методы анализа цепей» студенты должны изучить: закон Ома, законы Кирхгофа, баланс мощностей, теорию двухполюсников, метод эквивалентного генератора, метод наложения, метод узловых потенциалов, метод контурных токов.

В ходе освоения раздела 2 «Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей» студенты должны изучить: символический метод расчета цепей, комплексную передаточную функцию, методы расчета частотных характеристик цепей.

В ходе освоения раздела 3 «Режим негармонических воздействий» студенты должны изучить различные методы анализа переходных процессов в электрических цепях: классический, временной, операторный.

В ходе освоения раздела 4 «Цепи с распределенными параметрами» студенты должны изучить следующие вопросы: телеграфные уравнения и вторичные параметры линии, падающая и отраженная волны в линии, уравнения передачи длинной линии, линия без потерь.

В ходе освоения раздела 5 «Четырехполюсники» студенты должны изучить следующие вопросы: уравнения передачи четырехполюсников, схемы замещения четырехполюсников, характеристические параметры четырехполюсника, рабочие параметры четырехполюсников, регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников.

В ходе освоения раздела 6 «Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи» студенты должны изучить следующие вопросы: цепи с обратной связью, устойчивость линейных цепей с обратной связью, автоколебательные цепи, различные схемы автогенераторов.

В ходе освоения раздела 7 «Электрические фильтры» студенты должны изучить следующие вопросы: нормированные частоты и сопротивления, преобразование шкалы частот, основы синтеза ФНЧ-прототипа.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний,

формирование умений и навыков представления об различных способах моделирования электрических цепей.

В процессе проведения практических работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков расчета различных параметров электрических цепей.

При подготовке к зачету, экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам методам определения токов в цепях постоянного и переменного тока, теории длинных линий и четырехполюсников.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

## **АННОТАЦИЯ**

### **рабочей программы дисциплины**

#### **Теория электрических цепей**

#### **1. Цель и задачи дисциплины**

Изучение теории различных электрических цепей и ее прикладного применения для решения проблем передачи, обработки и распределения электрических сигналов управления и связи. Дисциплина должна обеспечивать формирование фундамента подготовки будущих специалистов в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Задачами изучения теории электрических цепей является обеспечение целостного представления студентов о проявлении электромагнитного поля в электрических цепях, составляющих основу различных устройств инфокоммуникационных технологий и систем связи.

#### **2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 70 часов, ЛР – 35 часов, ПЗ – 53 часа, СРС – 67 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 252 часа, 7 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Основные законы и общие методы анализа цепей
2. Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей
3. Режим негармонических воздействий
4. Цепи с распределенными параметрами
5. Четырехполюсники
6. Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи
7. Электрические фильтры

#### **3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-4 - способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

ПК-7 - готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта.

ПК-16 - готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования.

**4. Вид промежуточной аттестации:** зачет, экзамен, КР

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 201\_\_-201\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.,  
(разработчик)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО  
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС			
ОПК-4	способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ	1. Основные законы и общие методы анализа цепей	1.1. Элементы цепей.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа			
			1.2. Закон Ома.	контрольная работа			
			1.3. Законы Кирхгофа.	контрольная работа			
			1.4. Резистивные цепи.	контрольная работа			
			1.5. Баланс мощностей.	контрольная работа			
			1.6. Двухполюсники.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа			
			1.7. Метод эквивалентного генератора.	контрольная работа			
			1.8. Метод наложения.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа			
			ПК-7	Готовность к изучению научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике проекта		1.9. Метод узловых потенциалов.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа
						1.10. Метод контурных токов.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа
ПК-16	готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике	2. Режим гармонических колебаний и частотные характеристики цепей	2.1. Гармоническое колебание.	контрольная работа			
			2.2. Комплексные величины.	контрольная работа			
			2.3. Символическая схема.	контрольная работа			
			2.4. Символический метод расчета цепей.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа			

исследования		2.5.Баланс мощностей.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа
		2.6.Комплексная передаточная функция.	контрольная работа
		2.7.Частотные характеристики цепей.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа
		2.8.Колебательные контуры и их параметры.	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа
	3.Режим негармонических воздействий	3.1.Классический метод анализа.	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		3.2.Временной метод анализа.	курсовая работа
		3.3.Операторный метод анализа.	курсовая работа
	4. Цепи с распределенными параметрами	4.1.Длинные линии.	курсовая работа
		4.2.Телеграфные уравнения и вторичные параметры линии.	курсовая работа
		4.3.Падающая и отраженная волны в линии.	курсовая работа
		4.4.Уравнение передачи длинной линии.	курсовая работа
		4.5.Линия без потерь.	курсовая работа
		4.6.Принципы использования отрезков длинных линий без потерь.	курсовая работа
	5.Четырехполюсники	5.1.Уравнения передачи четырехполюсников.	курсовая работа
		5.2.Параметры четырехполюсников.	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		5.3.Схемы замещения четырехполюсников.	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		5.4.Характеристические параметры четырехполюсника.	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		5.5.Рабочие параметры четырехполюсников.	курсовая работа
		5.6.Регулярные однонаправленные соединения четырехполюсников.	курсовая работа

	6.Цепи с обратной связью и автоколебательные цепи	6.1.Цепи с обратной связью.	курсовая работа
		6.2.Устойчивость линейных цепей с обратной связью.	курсовая работа
		6.3.Автоколебательные цепи.	курсовая работа
		6.4.Различные схемы автогенераторов.	курсовая работа
	7.Электрические фильтры	7.1.Основные понятия и определения	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		7.2.Нормированные частоты и сопротивления.	Отчеты по лабораторным работам, курсовая работа
		7.3.Преобразование шкалы частот.	курсовая работа
		7.4.Основы синтеза ФНЧ-прототипа.	курсовая работа

## 2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<b>Знать</b> (ОПК-4): -навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях. (ПК-7): - основы теории, методы и средства теоретического и экспериментального исследования линейных и нелинейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях; основы теории четырехполюсников и цепей с	<b>отлично</b>	Во время защиты контрольной работы студент показал знание все основных определений и продемонстрировал уверенное умение использовать методы расчета электрических цепей, владение достаточным уровнем понимания материала, и способностью самостоятельно высказать мысль на научно-техническом языке.
		Во время защиты контрольной работы студент показал не полное понимание материала и навыков владения практическими приемами.

<p>распределенными параметрами, устойчивости электрических цепей с обратной связью, электрических аналоговых, дискретных и цифровых фильтров. (ПК-16): - навыки сбора научно-технической информации в отечественных и зарубежных источниках. <b>Уметь</b> (ОПК-4): -осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов в области теории электрических цепей. (ПК-7): - рассчитывать и измерять параметры и характеристики линейных и нелинейных электрических цепей, рассчитывать и анализировать параметры электрических цепей и фильтров на персональных компьютерах. (ПК-16): -изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области исследования электрических цепей. <b>Владеть</b> (ОПК-4): -навыками использования универсальных пакетов прикладных компьютерных</p>	<p><b>удовлетворительно</b></p>	<p>Во время защиты контрольной работы студент показал слабое понимание материала и навыков владения практическими приемами.</p>
	<p><b>неудовлетворительно</b></p>	<p>Во время защиты контрольной работы студент не продемонстрировал теоретических знаний по теме работы, либо не показал ни каких практических навыков.</p>
	<p><b>зачтено</b></p>	<p>Во время защиты лабораторных работ и контрольной работы студент ответил на поставленные преподавателем вопросы.</p>
	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>Во время защиты лабораторных работ и контрольной работы студент не смог дать ответы на поставленные преподавателем вопросы. Либо отчет имеет ряд замечаний.</p>

<p>программ по исследованию электрических цепей. (ПК-7):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками экспериментального исследования электрических цепей в рамках физического и математического моделирования.</li> </ul> <p>(ПК-16):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками обработки собранной научно- технической информации в области исследования электрических цепей.</li> </ul>		
---	--	--

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Профиль Многоканальные телекоммуникационные системы от «б» марта 2015 г. №174

**для набора 2015 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «13» июля 2015 г. № 475

**для набора 2016 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «б» июня 2016г. №429

**для набора 2017 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «б» марта 2017г. №125

**для набора 2018 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. №130

**Программу составил:**

Игнатъев И.В. заведующий кафедрой УТС, доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры УТС

от «28» декабря 2018 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ И.В. Игнатъев

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой \_\_\_\_\_ И.В. Игнатъев

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета ЭиА

от «28» декабря 2018 г., протокол № 5

Председатель методической комиссии факультета \_\_\_\_\_ А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник  
учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_